

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
MESTRADO EM ENGENHARIA CIVIL**

**ESTUDO DAS EMISSÕES DE BIOGÁS EM CAMADAS DE
COBERTURAS DE ATERRO DE RESÍDUOS SÓLIDOS
URBANOS**

Laís Roberta Galdino de Oliveira

RECIFE, AGOSTO DE 2013

Laís Roberta Galdino de Oliveira

**ESTUDO DAS EMISSÕES DE BIOGÁS EM CAMADAS DE
COBERTURAS DE ATERRO DE RESÍDUOS SÓLIDOS
URBANOS**

Dissertação submetida ao corpo docente da Coordenação dos Programas de Pós-Graduação da Universidade Federal de Pernambuco, como parte dos requisitos necessários à obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Civil.

Área de Concentração: Geotecnia

Linha de Pesquisa: Geotecnia Ambiental

Orientador: Prof. Dr. José Fernando Thomé Jucá

Co-orientador: Prof^a. Dr^a. Maria Odete Holanda Mariano

RECIFPE, AGOSTO DE 2013

Catálogo na fonte
Bibliotecário Vimário Carvalho da Silva, CRB-4 / 1204

- O48e Oliveira, Laís Roberta Galdino de.
Estudo das emissões de biogás em camadas de coberturas de aterro de resíduos sólidos urbanos. / Laís Roberta Galdino de Oliveira. - Recife: A Autora, 2013.
xi, 93 folhas, il., gráfs., tabs.
- Orientador: Prof^o. Dr. José Fernando Thomé Jucá.
Co-orientador: Prof^a Dr^a. M^a Odete Holanda Mariano.
Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2013.
Inclui Referências bibliográficas, anexos, listas de figuras e de tabelas.
1. Engenharia Civil. 2. Resíduos sólidos. 3. Aterro. 4. Biogás.
5. Emissões fugitivas. I. Jucá, José Fernando Thomé (orientador).
II. Mariano, Maria Odete Holanda. III. Título.

624 CDD (22. ed.)

UFPE
BCTG/2013-267



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

A comissão examinadora da Defesa de Dissertação de Mestrado

**ESTUDO DAS EMISSÕES DE BIOGÁS EM CAMADAS DE COBERTURAS DE
ATERRO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS**

defendida por

Laís Roberta Galdino de Oliveira

Considera a candidata APROVADA

Recife, 30 de agosto de 2013

Orientadores:

Prof. Dr. José Fernando Thomé Jucá – UFPE
(orientador)

Prof.^a Dr.^a Maria Odete Holanda Mariano – UFPE
(co-orientadora)

Banca Examinadora:

Prof. Dr. José Fernando Thomé Jucá – UFPE
(orientador)

Prof. Dr. Fernando Antônio Medeiros Marinho – USP
(examinador externo)

Prof. Sílvio Romero de Melo Ferreira – UFPE
(examinador interno)

“Cada dia que amanhece assemelha-se a uma página em branco, na qual gravamos os nossos pensamentos, ações e atitudes. Na essência, cada dia é a preparação de nosso próprio amanhã”.

Chico Xavier

AGRADECIMENTOS

À Deus por permitir que mais um objetivo fosse atingido em minha vida.

Aos meus pais, Mirian e Ricardo pela educação e pelo incentivo, por colocarem a minha formação profissional como prioridade, pelo carinho e, principalmente, pelo amor.

À minha irmã Thaís e meu cunhado Vinícius, sempre motivadores, meus eternos amigos.

Ao meu amor e companheiro, Derovil, pela força e incentivo profissional.

A toda minha família, pelos bons momentos de convivência familiar, os quais foram indispensáveis para conclusão e sucesso de mais uma etapa de minha vida.

Aos orientadores José Fernando Thomé Jucá e Maria Odete Holanda Mariano, pela confiança depositada.

Aos professores da área de Geotecnia da UFPE em especial ao Prof^o Sílvio Romero Ferreira pela contribuição para a melhoria deste trabalho.

A Régia Lopes, por despertar em mim o interesse por pesquisas.

À Empresa de Limpeza Urbana do Recife (EMLURB), em nome dos amigos e companheiros do Aterro da Muribeca, Aduino, Josélia, Oliab, Alemão, Sílvio e Carlinhos.

À Gutemberg, Seu Severino e Gerson que me ajudaram bastante na realização de ensaios no Laboratório de Solos.

Aos colegas Rose Mary Nascimento, Antônio Brito e Felipe Maciel.

Às amigas de todas as horas Janice, Raquele, Taís, Leila, Natali, Ana Carolina e Paula pelo apoio, pelas conversas, desabafos e compreensões.

Aos amigos do Grupo de Resíduos Sólidos.

À Companhia Hidro Elétrica do São Francisco (CHESF) e ao CNPq pelo apoio financeiro.

RESUMO

Um camada de cobertura eficiente de um aterro sanitário deve ter baixa permeabilidade às águas das chuvas e ao biogás produzido pela decomposição dos resíduos. De forma a minimizar, quantidade de água que infiltra no aterro e as emissões fugitivas para a atmosfera. Este trabalho objetivou, especificamente, avaliar as emissões de biogás pelo sistema de drenagem e em três diferentes configurações de camada de cobertura ao longo do tempo (2009-2012), em uma célula experimental localizada no antigo Aterro de resíduos da Muribeca, Jaboatão dos Guararapes/PE. Uma das camadas apresentou uma composição convencional de 70 cm de solo compactado, e as demais foram confeccionadas com materiais alternativos: a barreira capilar foi constituída por uma subcamada de pedra britada com espessura de 20 cm, sobreposta por uma subcamada de 50cm de solo compactado e a camada metanotrófica, composta por uma subcamada inferior de 30 cm, constituída com solo compactado e uma superior também de 30 cm com mistura de solo e composto de podaço (nas proporções de 1:1 e 3:4). As determinações dos fluxos dos gases CH_4 e CO_2 , em cada tipo de cobertura da célula experimental, utilizou a metodologia do ensaio com placa de fluxo estática descrita por Maciel (2003). Analisando dados históricos das emissões pela camada de cobertura obtidos nos doutoramentos de Maciel (2009) e Lopes (2011), e os resultados obtidos nesta dissertação, pode-se observar que a emissão de biogás tanto pelo sistema de drenagem quanto pela camada de cobertura foi significativamente reduzida ao longo do tempo, devido a redução da matéria carbonácea nos resíduos aterrados. Também pode-se observar uma forte influência dos períodos secos e chuvosos em ambas as emissões. Com relação as camadas de cobertura estudadas, as emissões fugitivas pela Camada Convencional apresentou um fluxo de metano 6 vezes maior para a camada metanotrófica e 15 vezes maior para a barreira capilar. Onde, além das características construtivas da camada de cobertura, o fator que mais influenciou foi a pressão do biogás dos resíduos aterrados.

Palavras chaves: engenharia civil; aterro de resíduos sólidos urbanos; biogás; camadas de cobertura; emissões fugitivas.

ABSTRACT

An efficient top cover of a landfill must have low permeability to rainwater and the biogas produced by waste decomposition. In order to minimize the amount of water that infiltrates the landfill and fugitive emissions to the atmosphere. This study aimed to evaluate, specifically, evaluate the emission of biogas drainage system and three different configurations of the top cover, over time (2009-2012), in an Experimental Cell located within the old Muribeca's Landfill, Jaboatão Guararapes/PE. One of the top cover presented a composition conventional 70 cm compacted soil, and the others were made with alternative materials: a capillary barrier was formed by a sublayer of gravel with a thickness of 20 cm, overlaid by a sublayer of 50cm of compacted soil layer and methanotropic consisting of a lower sublayer 30 cm constituted with compacted soil and also higher with 30 cm mixture of soil and pruning compound (in the ratios 1:1 and 3:4). The measurements of the flows of gases CH_4 and CO_2 , in every type of the top cover in the Experimental Cell, used the methodology the assay with flow chamber static described by Maciel (2003). Analyzing historical data of emissions by the top cover obtained doctorates in Maciel (2009) and Lopes (2011) and results obtained in this paper, can see that the emission of biogas both the drainage system as the cover layer was significantly reduced over time because of reduction of carbonaceous matter in the waste grounded. One can also observe a strong influence of the dry and rainy periods in both emissions. With respect top cover studied, the fugitive emissions by conventional layer presented a stream of methane 6 times larger for the layer methanotropic and 15 times greater for the capillary barrier. Where, in addition to the constructive characteristics of the overburden, the factor that most influenced was the pressure of biogas waste grounded.

Key words: civil engineering; municipal solid waste landfill; biogas; top cover; fugitive emissions.

SUMÁRIO

CAPITULO I – INTRODUÇÃO	1
1.1 Introdução	1
1.2 Objetivos	3
1.3 Estrutura da dissertação.....	4
CAPÍTULO II – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	5
2.1 Produção de biogás em Aterros de Resíduos Sólidos Urbanos (ARSU).....	5
2.2 Sistemas de cobertura final de ARSU	13
2.2.1 Camada convencional	14
2.2.2 Camada metanotrófica.....	16
2.2.3 Barreira capilar	18
2.3 Fluxo em solos não saturados.....	19
2.4 Emissões fugitivas de biogás em ARSU	21
CAPÍTULO III – MATERIAIS E MÉTODOS.....	27
3.1 Área de estudo.....	28
3.2 Tipos de camadas de cobertura da célula experimental	29
3.2 Caracterização geotécnica do solo das camadas de cobertura.....	32
3.2.1 Ensaio de caracterização geotécnica.....	32
3.2.2 Ensaio de membrana de pressão.....	33
3.2.3 Ensaio de permeabilidade.....	34
3.3 Emissões de biogás	37
3.3.1 Emissões pelo sistema de drenagem vertical	37
3.3.2 Emissões fugitivas pela camada de cobertura	39
3.3 Dispositivos de medição de pressão e concentração (DMPC).....	43
3.4 Relação entre as emissões entre pelos drenos e pela camada de cobertura.....	45

CAPITULO IV- RESULTADOS E DISCUSSÕES	47
4.1 Caracterização das camadas de cobertura	47
4.1.1 Características geotécnicas.....	47
4.1.2 Curva característica do solo	49
4.2 Emissões de biogás pelo sistema de drenagem	51
4.3 Emissões fugitivas de biogás pelas camadas de cobertura.....	57
4.3.1 Camada convencional	58
4.3.2 Barreira capilar	61
4.3.3 Camada metanotrófica.....	64
4.3.4 Comparação das emissões de metano dentre as camadas estudadas	67
4.4 Emissões de biogás pelos drenos e pela camada de cobertura	69
4.4.1 Camada convencional	69
4.4.2 Barreira capilar	71
4.4.3 Camada metanotrófica.....	73
CAPITULO V – CONSIDERAÇÕES FINAIS E SUGESTÕES PARA NOVAS PESQUISAS 76	
5.1 Considerações finais.....	76
5.2 Sugestões para novas pesquisas	77
REFERÊNCIAS BIBLIOGRAFICAS	78
ANEXO I	83
ANEXO II	90

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO II

Figura II.1. Fases de geração de gases num aterro. FONTE: BRAGA (2011) adaptado TCHOBANOGLOUS & KREITH (2002).....	6
Figura II.2. Principais fatores intervenientes no processo de geração de gases em aterros (MUDAU, 2012 apud FIRMO, 2013).	10
Figura II.3. Produção de metano e recuperação ao longo da vida do aterro (HUBER-HUMER et. al., 2008 apud LOPES, 2011).....	13
Figura II.4: Técnicas de Medição de Emissões: 1) Técnica de Placa de fluxo: a) estática b) dinâmica; 2) Gradiente de concentração subsuperficial; 3) Método Micrometeorológico; 4) Traçador e pluma de dispersão (Adaptado de FISCHER, 1999).....	21
Figura II.5: Emissões de metano do aterro de Aguazinha-Olinda-PE (MARIANO, 2008).....	23

CAPÍTULO III

Figura III.1: Vista aérea frontal do Aterro Controlado da Muribeca com a localização da célula experimental (GOOGLE MAPS, 2012).	28
Figura III.2: Distribuição dos três tipos de cobertura na camada superior da célula experimental (MACIEL, 2009).	29
Figura III.3: Perfis das camadas experimentais na região superior da Célula (LOPES, 2011).....	30
Figura III.4: Coleta de amostras amolgadas	32
Figura III.5: Coleta de amostras indeformadas	33
Figura III.6: Ensaio de membrana de pressão: (a), saturação dos corpos de prova e da membrana, (b) colocação da membrana na base do equipamento, (c) colocação do corpo de prova na célula, (d) colocação de ligas de borracha para maior fixação, (e) fechamento da célula para aplicação da sucção, (f) início do ensaio.....	33
Figura III.7: Ensaio de permeabilidade: (a) colocação de pedras porosas e papel filtro no topo e na base do corpo de prova, (b) retirada do ar da membrana que irá envolver o corpo de prova, (c) encamisamento do corpo de prova, (d) colocação de ligas de borracha para maior fixação, (e) colocação e fechamento do célula de acrílico, (f) início do ensaio, (g) equipamento utilizado no ensaio.....	36
Figura III.8: Layout final da célula experimental da Muribeca (MACIEL, 2009).....	38
Figura III.9: Monitoramento da vazão do biogás dos drenos	39
Figura III.10: Equipamentos utilizados nos ensaios de placa de fluxo	40

Figura III.11: Determinação do fluxo de gases a partir de ensaios de placa de fluxo (MARIANO, 2008).	42
Figura III.12: Coleta de amostra pra determinação de umidade e peso específico	42
Figura III.13: DMPC (a) colocação de brita e tela na base do CAP (b) conexão de bico de latão e mangueira (c) colocação do conjunto de CAP e mangueira no solo (d) medição de concentração (e) e (f) DMPC instalados nas camadas de cobertura (LOPES, 2011).	44
Figura III.14: Localização dos DMPC's (LOPES, 2011).....	45

CAPÍTULO IV

Figura IV.1: Curva característica da camada convencional – Umidade gravimétrica versus sucção 49	
Figura IV.2: Curva característica da camada convencional – Grau de saturação versus sucção	50
Figura IV.3: Curva de retenção de água ajustada pelo Modelo de van Genuchten (1980)	51
Figura IV.4: Vazão de biogás emitido pelo sistema de drenagem vertical da célula experimental .	52
Figura IV.5: Concentração do biogás emitido pelo sistema de drenagem vertical da célula experimental.....	54
Figura IV.6: Pressão de biogás pelo sistema de drenagem vertical da célula experimental	56
Figura IV.7: Fatores que podem influenciar na emissão de CH ₄ na camada convencional	60
Figura IV.8: Fatores que podem influenciar na emissão de CH ₄ na barreira capilar	63
Figura IV.9: Fatores que podem influenciar na emissão de CH ₄ na camada metanotrófica	66
Figura IV.10: Fluxo de CH ₄ nos ensaios realizados no período de estudo	68
Figura IV.11: Fluxo de dióxido de carbono nos ensaios realizados no período de estudo	68
Figura IV.12: Emissões de metano pelo dreno 1 e pela camada convencional ao longo do tempo .	69
Figura IV.13: Relação entre as emissões de metano pela camada convencional e a emissão total ao longo do tempo.....	70
Figura IV.14: Emissões de metano pelo dreno 2 e pela barreira capilar ao longo do tempo	71
Figura IV.15: Relação entre as emissões de metano pela barreira capilar e a emissão total ao longo do tempo.....	72
Figura IV.16: Emissões de metano pelo dreno 3 e pela camada metanotrófica ao longo do tempo	73
Figura IV.17: Relação entre as emissões de metano pela camada metanotrófica e a emissão total ao longo do tempo.....	74

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO II

Tabela II.1. Variação da composição típica de biogás gerado em aterro de resíduos sólidos urbanos (NIKIEMA et. al., 2007 apud LOPES, 2011).	5
Tabela II.2. Intervalo de duração das fases da decomposição dos resíduos sólidos urbanos aterrados (AUGENSTEIN & PACEY, 1991).	8
Tabela II.3. Resultados experimentais do potencial de CH ₄ encontrados na literatura (MACIEL, 2009).	9
Tabela II.4. Parâmetros do ambiente interno e suas implicações na geração do biogás (MACIEL, 2009).	12
Tabela II.5. Informações geotécnicas da cobertura e feitos nas emissões (MACIEL, 2003).	16
Tabela II.6. Características gerais dos métodos de investigação de emissões (MACIEL, 2009). ...	22
Tabela II.7. Fluxo de CH ₄ em camadas de cobertura de aterros de resíduos sólidos reportados na literatura (Adaptado de LOPES, 2011).	25

CAPÍTULO III

Tabela III.1: Caracterização do solo da cobertura superior da célula experimental em 2008 (MACIEL, 2009).	31
Tabela III.2: Equipamentos utilizados nas medições de pressão e concentração nos dos drenos de biogás e nos ensaios de placa e suas respectivas características	40

CAPÍTULO IV

Tabela IV.1: Caracterização do solo das camadas de cobertura da célula experimental em 2011 (LOPES, 2011) e em 2012.	48
Tabela IV.2: Variação da concentração dos componentes do biogás neste estudo e comparação com a literatura	55
Tabela IV.3: Fluxos de biogás e parâmetros que influenciam na camada convencional	59
Tabela IV.4: Fluxos de biogás e parâmetros que influenciam na barreira capilar	62
Tabela IV.5: Fluxos de biogás e parâmetros que influenciam na camada metanotrófica.	65

CAPITULO I – INTRODUÇÃO

1.1 Introdução

A degradação anaeróbia da matéria orgânica em aterros de resíduos sólidos urbanos é uma fonte importante dos principais gases responsáveis pelo aquecimento global, o metano (CH₄) e o gás carbônico (CO₂), sendo denominados gases de efeito estufa (GEE).

O efeito estufa é um fenômeno que ocorre de forma natural na atmosfera, que mantém a temperatura no planeta Terra. No entanto, devido ao aumento na concentração dos GEE proveniente, principalmente, das atividades humanas, pesquisadores esperam que o efeito estufa se intensifique, e conseqüentemente aumento das temperaturas do planeta (ALVES & VIEIRA, 1998).

De acordo com PEER *et. al.* (1993) *apud* TAGARIS *et. al.* (2003), os aterros sanitários são fontes significativas de metano, sendo classificado em terceiro lugar entre as fontes antropogênicas, perdendo apenas para os arrozais e os ruminantes.

Dentre as fontes nacionais emissoras de metano, os resíduos sólidos urbanos representam 12% do total, sendo que 84% das emissões são oriundas dos aterros (PNMC, 2008).

Neste contexto, surgiu a Política Nacional sobre Mudança do Clima (2009) que foi uma oficialização do compromisso voluntário do Brasil junto à Convenção-Quadro da ONU sobre Mudança do Clima de redução de emissões de gases de efeito estufa entre 36,1% e 38,9% das emissões projetadas até 2020. No âmbito dos resíduos sólidos urbanos, o plano contemplou medidas de mitigação para o setor de resíduos por meio da recuperação de metano em aterros sanitários, incineração com recuperação energética e reciclagem, além de metas de incentivo ao aproveitamento energético do biogás de aterro sanitário.

Em 2010, foi instituída a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), que traz instrumentos importantes para o enfrentamento dos principais problemas ambientais, sociais e econômicos decorrentes do manejo inadequado dos resíduos sólidos. No âmbito de destinação final dos resíduos, a PNRS criou uma meta para a eliminação dos lixões existentes e a disposição ambientalmente adequada dos resíduos sólidos até 2014.

Na disposição adequada, em aterros sanitários tem-se um conjunto de sistemas e medidas necessárias para proteção do meio ambiente contra danos e degradações.

Um dos sistemas de proteção ao meio ambiente é a camada de cobertura final, que funciona como uma barreira de impermeabilização dos resíduos as condições do ambiente externo, impedindo a infiltração da água precipitada (diminuindo a taxa de formação de lixiviado) e a liberação de gases para a atmosfera (MARIANO, 2008).

Segundo BARLAZ *et. al.* (2004) *apud* TEIXEIRA *et. al.* (2009), os sistemas de drenagem de biogás mais eficientes são capazes de captar 75% do biogás gerado em um aterro sanitário; entretanto, na maioria dos casos a eficiência está entre 40 e 60%, o excedente pode atravessar a camada de cobertura e escapar para a atmosfera.

Diante desta problemática, nota-se a importância de investigar se as camadas de cobertura estão cumprindo sua função de isolar os resíduos aterrados e minimizar a emissões de agentes poluentes no meio ambiente, bem como avaliar seu desempenho ao longo dos anos.

Para a medição do fluxo de gases pelas camadas de cobertura, os principais métodos de investigação correspondem à placa de fluxo estática, placa de fluxo dinâmica e análises por infravermelho (MARIANO & JUCÁ, 2010).

A utilização de placas de fluxo apresenta vantagens por ser um método mais preciso para a determinação do fluxo pontual, exigir mão de obra pouco especializada, possibilitar a determinação das características e parâmetros do solo de cobertura no local do ensaio, permitir a avaliação simultânea de diversos gases, além de possibilitar a análise da influência da idade do resíduo, das condições atmosféricas e das pressões do gás no contato solo-resíduo (COSSU *et. al.*, 1997 *apud* MARIANO & JUCÁ, 2010).

As emissões de biogás das camadas de cobertura existentes na célula experimental vêm sendo quantificadas desde 2009, através do ensaio de placa de fluxo e em termos de fluxos dos gases metano (CH₄) e gás carbônico (CO₂). Os resultados obtidos no período de 2009 a Agosto de 2010 fizeram parte das teses de doutoramento de MACIEL (2009) e LOPES (2011). Esta base de dados pode ser visualizada no Anexo I.

Para esta dissertação além da utilização dos dados acima citados foram realizados mais 45 ensaios no período de setembro de 2010 a abril de 2012.

1.2 Objetivos

O presente trabalho tem como objetivo geral avaliar as emissões de biogás ao longo do tempo (3 anos, de 2009 a 2012) em três diferentes configurações de camadas de cobertura no Aterro Experimental da Muribeca-PE. Os objetivos específicos a serem pesquisados são:

- analisar as características geotécnicas do solo atual das camadas de cobertura da célula experimental da Muribeca;
- avaliar as emissões de biogás através do sistema de drenagem durante 4 anos (2008-2012) e períodos secos e chuvosos;
- quantificar as emissões de biogás através das camadas de cobertura, no período de Setembro de 2010 a Janeiro de 2011 e de Abril a Junho de 2012, analisando a influência das características do solo da camada de cobertura, do biogás produzido e dos períodos secos e chuvosos;
- estabelecer uma relação entre as emissões de biogás pelo sistema de drenagem e através das camadas de cobertura ao longo de 3 anos (2009-2012) e de períodos secos e chuvosos.

1.3 Estrutura da dissertação

Esta tese está dividida em seis capítulos.

O Capítulo 1 introduz o assunto que será abordado nesta dissertação, além de mostrar a importância do tema na área de Geotecnia Ambiental e Aterros de Resíduos Sólidos Urbanos (ARSU).

O Capítulo 2 apresenta a revisão bibliográfica sobre produção de biogás, sistemas de cobertura final e emissões fugitivas de biogás em ARSU.

O Capítulo 3 descreve os materiais e os métodos empregados nos ensaios de campo e laboratório realizados, além da descrição do local de estudo.

O Capítulo 4 apresenta e discute os resultados dos ensaios realizados durante o período de estudo do Aterro Experimental da Muribeca.

O Capítulo 5 apresenta as conclusões desta pesquisa e sugestões para trabalhos futuros.

Os Anexos I e II apresentam respectivamente, a base de dados de emissões fugitivas na célula experimental coletada pelos autores MACIEL (2009) e LOPES (2011), utilizada nesta dissertação para análise ao longo do tempo, e as planilhas de cálculo da relação entre o fluxo médio mensal de metano e dióxido de carbono nas diferentes camadas e a emissão total.

CAPÍTULO II – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Produção de biogás em Aterros de Resíduos Sólidos Urbanos (ARSU)

O mecanismo de formação de gases em aterros de RSU é muito complexo devido à diversidade de materiais e compostos presentes e de suas possíveis interações físico-químicas e biológicas ao longo do tempo (MACIEL, 2009).

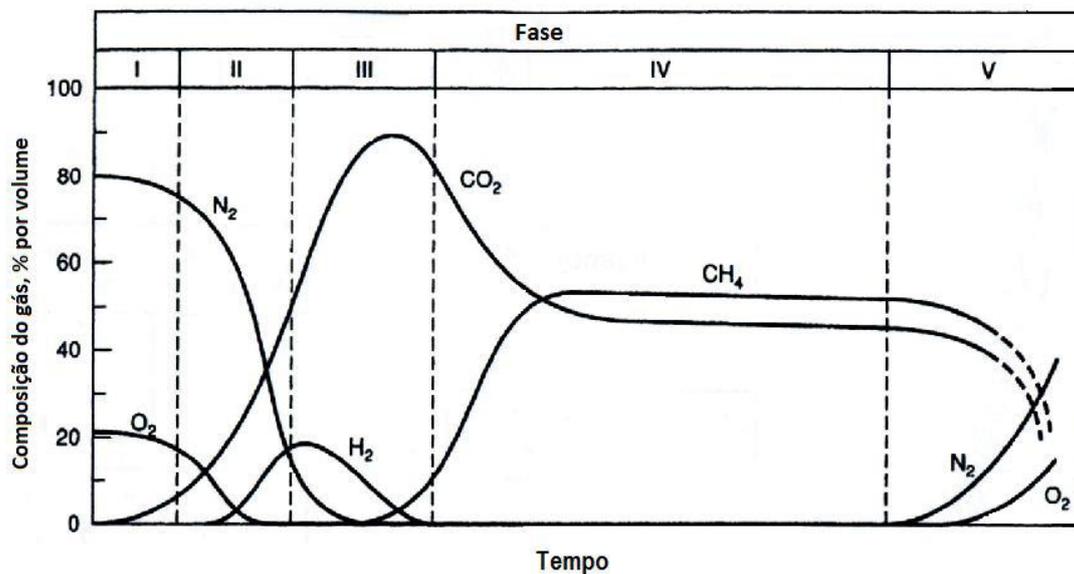
NIKIEMA *et. al.* (2007) realizou um estudo sobre a composição do biogás de aterros de resíduos sólidos urbanos, e apresentou as concentrações típicas para vários compostos encontrados no biogás, mostrado na Tabela II.1. Para o referido autor, as principais variáveis que influenciam na variação da composição do biogás é o tipo de resíduo e idade do local de disposição final.

Tabela II.1. Variação da composição típica de biogás gerado em aterro de resíduos sólidos urbanos (NIKIEMA *et. al.*, 2007 *apud* LOPES, 2011).

COMPONENTES	CONCENTRAÇÃO MÉDIA (%)
Metano (CH ₄)	30 - 70
Dióxido de carbono (CO ₂)	20 - 50
Nitrogênio (N ₂)	1 - 5
Oxigênio (O ₂)	0,1 - 1,0
Amônia (NH ₃)	0,1 - 1,0
Compostos sulfúricos (H ₂ S)	0,0 - 0,2
Hidrogênio (H ₂)	0,0 - 0,2
Monóxido de carbono (CO)	0,0 - 0,2
Outros gases-traço	0,01 - 0,06

A Figura II.1 apresenta a geração de gases ao longo de 5 distintas fases de decomposição anaeróbia, e em função do tempo da disposição final dos resíduos.

Figura II.1. Fases de geração de gases num aterro. FONTE: BRAGA (2011) adaptado TCHOBANOGLIOUS & KREITH (2002).



Fase I – Fase inicial

Processo de decomposição aeróbia que se estabelece à medida que os resíduos vão sendo depositado e se estende até um curto período após a execução do sistema de cobertura, quando ainda existe oxigênio livre nos vazios da massa de RSU (MACIEL, 2009).

Nessa fase existe a predominância do ar atmosférico, e à medida que o O₂ é consumido, o CO₂ é produzido praticamente na mesma proporção, de forma que não existe incremento na geração de gás, embora haja alteração na sua composição (CO₂ substituindo o O₂).

Fase II – Fase de transição

Na fase de transição o interior do aterro torna-se um reator bioquímico onde se começa a verificar a rarefação do oxigênio e surge a anaerobiose (BRAGA, 2011).

Ou seja, acontece uma transição para a condição anaeróbia onde o oxigênio é consumido pelos microrganismos aeróbicos juntamente com a decomposição de materiais, formando o dióxido de carbono (CO₂) e diminuindo a composição dos demais gases (FIRMO, 2013).

No final desta fase, a concentração dos gases O₂ e N₂ já é bem reduzida, a produção de CO₂ é significativamente acelerada e inicia-se uma curta fase de geração do H₂.

Fase III – Fase ácida ou acidogênica

Inicia-se a hidrólise de componentes com maior massa molecular, tais como os lípidos, polissacarídeos, proteínas e ácidos nucleicos, em compostos mais simples, para que possam ser mais facilmente utilizados pelos microrganismos como fonte de energia (BRAGA, 2011). E, através da acidogênese, os compostos são transformados em ácido acético.

Nessa fase tem-se a predominância da geração de CO₂, embora existam outros gases como o H₂.

Fase IV – Fase metanogênica

Ocorre a fermentação metanogênica, onde um grupo de microrganismos anaeróbios converte o ácido acético e o hidrogênio gasoso que foi formado na fase ácida em metano e dióxido de carbono, dando, deste modo, origem aos dois principais constituintes do biogás (BRAGA, 2011).

Com relação aos gases, acontece uma redução/estabilização do teor de CO₂ e aumento/estabilização do teor de CH₄ (FIRMO, 2013).

Fase V – Fase de maturação

A matéria orgânica facilmente e medianamente degradável já foi praticamente consumida, os nutrientes ficaram restritos e os resíduos encontram-se em processo de bioestabilização, no entanto, os materiais recalcitrantes ainda são lentamente decompostos.

Verifica-se a conversão dos compostos orgânicos em metano e dióxido de carbono, traduzindo-se numa redução do biogás produzido ao longo do tempo (BRAGA, 2011).

O ingresso do O₂ e N₂ na massa de resíduos tende a ocorrer em virtude da queda da pressão interna dos gases causada pela fraca atividade microbiana (MACIEL, 2009), e as condições atmosféricas tendem a se estabelecer.

Como mostra a Figura II.1, a composição dos gases varia em função da fase de decomposição dos RSU. Alguns constituintes se fazem presentes em grandes quantidades (CH₄ e CO₂) e outros apenas, como elementos traços.

A duração e eficiência de cada uma das fases acima referidas depende de fatores específicos de cada região tais como o tipo de RSU que foram inseridos no aterro, bem como de fatores climáticos (BRAGA, 2011).

AUGENSTEIN & PACEY (1991) apresenta, na Tabela II.2, a duração estimada das fases de decomposição dos resíduos aterrados ao longo do tempo.

Tabela II.2. Intervalo de duração das fases da decomposição dos resíduos sólidos urbanos aterrados (AUGENSTEIN & PACEY, 1991).

Fases	Intervalo de duração das fases (Augestein e Pacey, 1991)
I	algumas horas a 1 semana
II	1 mês a 6 meses
III	3 meses a 3 anos
IV	8 anos a 40 anos
V	1 ano a mais de 40 anos

O potencial de geração de metano depende fundamentalmente das características químicas dos resíduos disposto no aterro, ou seja, da fração do resíduo que de fato pode ser transformada bioquimicamente em gás e das condições ambientais que permitirão esta degradação (MACIEL, 2009).

A Tabela II.3 confeccionada por MACIEL (2009) apresenta resultados do potencial de geração de CH₄ obtidos em diferentes estudos experimentais.

Tabela II.3. Resultados experimentais do potencial de CH₄ encontrados na literatura (MACIEL, 2009).

Referência	Potencial de CH ₄ (m ³ /t resíduo seco)	Informações adicionais
Reatores de laboratório e lisímetros		
Ham (1979) citando outros autores (Klein, Hitte e Pfeffer)*	105 – 130 **	Reatores de bancada, utilizou-se lodo de esgoto no processo.
Barlaz <i>et. al.</i> (1989)	77 – 152	56 reatores com 2 litros, utilizou-se recirculação no processo.
Barlaz <i>et. al.</i> (1989) citando revisão feita por Halvadakis (1983)	90 – 170	Não informado
Wang <i>et. al.</i> (1997)	301	Reatores de 2,2 litros, utilizou-se resíduo de comida, aprox. 500 g.
Tabasaran e Rettenberger (1987) citado por Wassermann <i>et. al.</i> (2005)*	60 – 150 **	Não informado detalhes do experimento
Vigneron <i>et. al.</i> (2005)	126 – 178	Reatores com volume de 1,1 litro
Radnidge <i>et. al.</i> (2005)	2,5 – 68	Reatores com volume de 200 litros e aprox. 65 kg de resíduo
Bayard <i>et. al.</i> (2005)	4 – 49	Reatores com volume de 35 litros e 10 kg de resíduo
Ham (1979) citando Streng*	19,5 **	Lisímetro de pequena dimensão. Produção acumulada após 2 anos.
Stegmann e Dernbach (1982) citado por Wassermann <i>et. al.</i> (2005)*	75 – 100	Não informado escala do experimento
Knox <i>et. al.</i> (2005) *	30 – 40 **	Lisímetro com 200 litros
Células piloto de grandes dimensões		
Radnidge <i>et. al.</i> (2005)	13	Célula piloto nº1 Swanbank – Austrália. (15 x 10 x 3 m, 550 t e tempo de operação 64 dias).
Barina <i>et. al.</i> (2005)	40 – 52	Células piloto em Dijon – França (≈2.000 m ² x 10 m, 15 a 18.000 t, resultados após 1 ano de operação)
Augestein <i>et. al.</i> (2005) citando outras referências	39 – 57 **	Reatores comerciais de grande porte (>3.500 m ³) em cidades da Espanha, França, Bélgica e Itália
Knox <i>et. al.</i> (2005)*	50 – 70 **	Células piloto em Brogborough – UK (40 x 25 x 20 m e 15.000 t). Produção não finalizada– resta ainda 25-50%.
Augestein <i>et. al.</i> (2005)	40 – 90	Célula piloto em Yolo County (EUA)
Reinhart e Twonsend (1998)	20 – 40	Célula piloto Mountain View – EUA (6 células de 31 x 31 x 14 m, aprox. 5.000 t, 4,5 anos de avaliação)
Aterros sanitários		
Krumpelbeck (2000) citado por Wassermann <i>et. al.</i> (2005) *	90 – 140	Dados de diferentes aterros
Wassermann <i>et. al.</i> (2005) *	60 **	Experiência de investigações de campo em Salzburg (Áustria)

Obs.: * os dados fornecidos pelos autores estavam expressos em termos da quantidade de biogás (CH₄ + CO₂). Adotou-se, para uniformizar os valores em termos de CH₄, uma composição média de 50% de CH₄. ** resultados expressos em termos de base úmida (MACIEL, 2009).

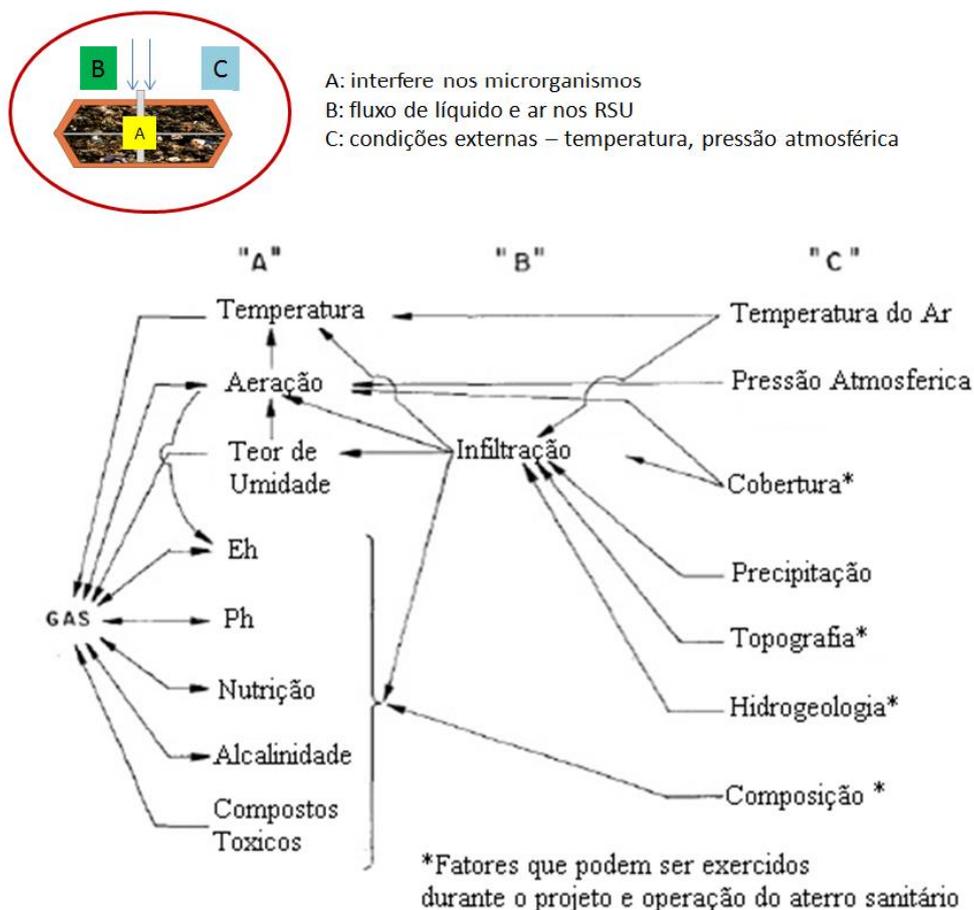
O referido autor observou que os ensaios conduzidos em escala laboratorial (reatores e lisímetros) apresentam em geral, potenciais de geração de CH₄ superiores aos estudos conduzidos em escalas de campo, tal fato pode estar relacionado com o maior controle das condições de degradação dos resíduos e a minimização de fuga de gases nos reatores.

Os fatores mais comuns para a biodegradação dos resíduos estão relacionados com a composição dos resíduos, umidade, temperatura e pH da massa de resíduos, além da disponibilidade de bactérias e nutrientes e presença de agentes inibidores na célula (EL-FADEL *et. al.*, 1997).

O conhecimento do potencial de influência de cada fator no favorecimento ou inibição das atividades bacterianas é muito importante para estimar e entender o comportamento da geração de gases nos aterros (MACIEL, 2009).

A Figura II.2 mostra, resumidamente, os principais fatores que afetam a geração de biogás em aterros de resíduos sólidos urbanos.

Figura II.2. Principais fatores intervenientes no processo de geração de gases em aterros (MUDAU, 2012 apud FIRMO, 2013).



Segundo MACIEL (2003), os fatores que mais influenciam a geração de biogás em aterros de resíduos sólidos são:

- Geometria do aterro: a altura da massa de resíduos e o sistema de cobertura final, que podem sofrer mais ou menos influência das condições atmosféricas.
- Composição dos resíduos: A composição afeta quantitativamente e qualitativamente a produção dos gases. A disponibilidade de frações mais facilmente degradáveis (carboidratos, proteínas e lipídios) significa uma maior quantidade de substrato para a atuação de microorganismos, desta forma, os resíduos com grande presença de matéria orgânica devem apresentar um maior potencial de biogás.
- Variáveis do ambiente interno: capacidade de favorecimento ou inibição das atividades bacterianas e a variação dos condicionantes externos são ocasionadas, principalmente, pela entrada de O₂ para o interior da massa de resíduos, que ocorre tanto na forma dissolvida, pelas águas pluviais que infiltram pelo sistema de cobertura, quanto na forma de gás devido ao aumento da pressão atmosférica local.

De acordo GUEDES (2007), um dos condicionantes ambientais mais importantes é a pressão atmosférica, visto que o fluxo de gás se desloca de região de maior pressão para região de menor pressão, então quando a pressão atmosférica é elevada, o ar atmosférico chega ao interior do aterro via camada de cobertura. Na condição oposta, a pressão atmosférica tende a aumentar o fluxo ascendente do biogás.

No estudo realizado por LOPES (2011), o período crítico para as emissões se deu nos meses de menores pressões atmosféricas (mínimas e máximas), na região do Aterro da Muribeca.

A Tabela II.4 apresenta uma adaptação realizada por MACIEL (2009) da revisão bibliográfica realizada por EL-FADEL *et. al.* (1997), onde pode-se visualizar a graduação do impacto e se o fator atua de forma positiva e/ou negativa na geração de gás.

Tabela II.4. Parâmetros do ambiente interno e suas implicações na geração do biogás (MACIEL, 2009).

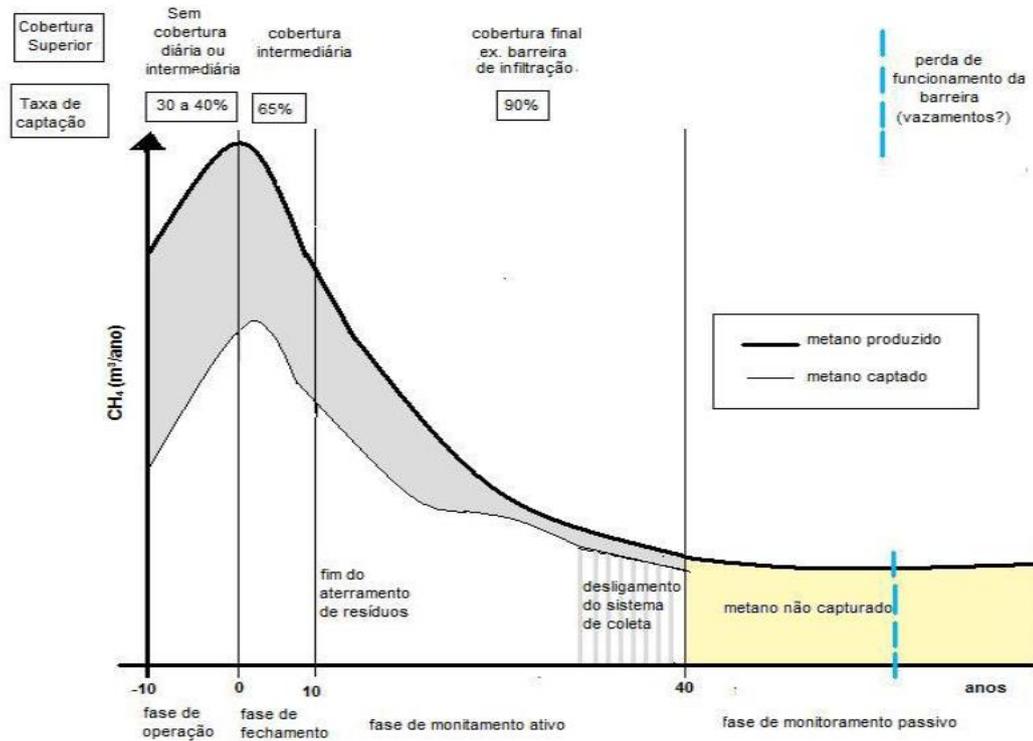
Parâmetros	Potencial de influência		
	Baixo	Médio	Alto
Composição resíduos*		(+ ou -)	
Peso específico	(+)		
Tamanho das partículas	(+)		
Temperatura		(+ ou -)	
pH*		(+ ou -)	
Nutrientes	(+ ou -)		
Bactérias	(+ ou -)		
Umidade			(+ ou -)
Oxigênio			(-)
Hidrogênio	(+ ou -)		
Sulfato	(-)		
Tóxicos		(-)	
Metais	(-)		

Por este motivo, a metodologia padrão para cálculo da geração de metano a partir de aterros de resíduos sólidos utilizada pelo Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) pode ser reescrita como mostrado na equação II.1.

$$\text{CH}_4\text{gerado} = \Sigma (\text{CH}_4\text{emitido} + \text{CH}_4\text{recuperado} + \text{CH}_4\text{oxidado}) \quad \text{Equação. II.1}$$

A equação acima considera que nem todo biogás produzido será captado pelo sistema de drenagem, parte do biogás passará pela camada de cobertura, podendo ser oxidado ou emitido, como mostra a Figura II.3.

Figura II.3. Produção de metano e recuperação ao longo da vida do aterro (HUBER-HUMER *et. al.*, 2008 *apud* LOPES, 2011).



É importante salientar que após 40 anos do encerramento das atividades do Aterro, o metano emitido não é mais capturado, para aproveitamento energético ou tratamento, porque não há mais viabilidade econômica, no entanto, a emissões que chegam a atmosfera é ambientalmente significativa.

2.2 Sistemas de cobertura final de ARSU

As camadas de cobertura finais de aterros de resíduos sólidos urbanos (ARSU) têm como finalidade evitar a infiltração de águas pluviais, e impedir que gases gerados na degradação da matéria escapem para a atmosfera. (COELHO *et. al.*, 2005).

Existem, basicamente, dois tipos de camadas de cobertura final para aterros de resíduos sólidos urbanos (RSU): as camadas convencionais e as alternativas (MARIANO, 2008).

Independente do tipo de camada a ser aplicada, a NBR 13896/97, estabelece, como parâmetro mínimo, um coeficiente de permeabilidade inferior a 10^{-6} m/s.

Segundo MARIANO (2008), é importante lembrar que tal norma não faz menção à exigência de tipo de solo, características geotécnicas, espessura e manutenção ao longo do tempo.

Como as camadas de cobertura finais encontram-se na maior parte do tempo em condições não saturadas, é importante se estabelecer parâmetros de controle para emissão de gases baseados nas características dos solos ao longo do tempo (LOPES, 2011), tais como: grau de compactação e saturação, sucção de entrada de ar no solo da camada de cobertura.

2.2.1 Camada convencional

As camadas convencionais de cobertura são aquelas confeccionadas com camadas de solo natural argiloso ou camadas intercaladas de solo natural argiloso e geossintéticos com vistas à impermeabilização de topo das células (MARIANO, 2008). Esse tipo de camada possui uma baixa condutividade hidráulica saturada, tipicamente 10^{-9} m/s ou menos (ZORNBERG *et. al.*, 2003).

No Brasil, as coberturas de aterros são confeccionadas como uma barreira de solo com espessura, em geral, 0,60 m, construída com materiais de baixa condutividade hidráulica saturada (tipicamente 10^{-5} m/s ou menos) e acima dessa uma camada de solo em torno de 0,15 m com cobertura vegetal (CATAPRETA, 2008).

Também segundo CATAPRETA (2008), apesar de desempenhos satisfatórios terem sido relatados para sistemas executados em regiões de clima úmido, problemas causados por ressecamento de camadas de argila têm proporcionado desempenho inadequado em regiões de clima árido – devido ao surgimento de fissuras.

O aparecimento de fissuras é um indício da ocorrência do fenômeno de contração das camadas de material argiloso, devido às variações da umidade solo, que ocorrem periodicamente, sob a influência das condições climáticas locais.

São por essas fissuras que se pode observar um aumento significativo na percolação de gases através da camada de cobertura.

Estudos realizados por MONTGOMERY & PARSONS (1989), MELCHIOR (1997) e KHIRE *et. al.*, (1997) mostram que, uma camada de cobertura convencional sem fissuras, percolam entre 1 e 4% da precipitação; já quando ocorrem fissuras nas mesmas, a capacidade de percolação fica entre 10 e 20% da precipitação (MARIANO, 2008).

A existência de fissuras, em determinadas épocas do ano, aumenta significativamente a permeabilidade da camada às águas das chuvas e às emissões fugitivas do biogás, culminando em ciclos de maiores (períodos de estiagem) e menores (períodos chuvosos) emissões fugitivas, durante a vida útil da camada de cobertura.

Por esse motivo, muitos estudos têm demonstrado que as camadas de cobertura convencionais de argila possuem algumas desvantagens significantes (EPA, 2003).

Vários estudos buscam investigar índices físicos dos solos que possam indicar picos de emissões fugitivas do biogás produzido pela decomposição dos resíduos aterrados.

Um deles foi um estudo realizado por BOECKX *et. al.* (1996) na Bélgica, onde o fator mais preponderante, nas emissões de metano, foi o teor de umidade do solo.

Em solos não saturados os únicos obstáculos que o gás encontra ao percolar são as partículas do solo, porém se ocorrer um acréscimo na umidade do solo, o volume de água nos poros vai aumentar, provocando uma diminuição na permeabilidade do solo ao ar, tendo em vista que a quantidade e a continuidade dos poros aerados ficam reduzidas (MACIEL, 2003).

A investigação de MARIANO (2008) também indicou características principais e secundários ligados aos fluxos máximos de metano pela camada de cobertura. Os principais foram: o grau de compactação e o grau de saturação da camada, e os secundários: a espessura e o tipo de solo utilizado na confecção à camada.

MACIEL (2003) listou os principais parâmetros geotécnicos da camada e seus respectivos efeitos na percolação dos gases (Tabela II.5).

Tabela II.5. Informações geotécnicas da cobertura e feitos nas emissões (MACIEL, 2003).

Informações geotécnicas	Possíveis efeitos nas emissões de gases para atmosfera
Tipo de solo	Solos de granulometria fina (argilas) são preferidos para controle das emissões (menor permeabilidade e maior retenção de umidade).
Espessura	Quanto maior a espessura da camada, maior a possibilidade de retenção física, química e biológica.
Umidade/Saturação	A presença de água nos vazios do solo reduz a percolação dos gases. Redução drástica para valores acima de 75% de saturação
Conteúdo volumétrico de ar	Quanto maior a presença de poros aerados na matriz, mais rápida é a velocidade dos gases no meio, conseqüentemente maiores emissões.
Peso específico/Compactação	O aumento do peso específico dificulta a passagem dos gases (menores porosidade e permeabilidade) minimizando as emissões.
Sucção	Importante relação com a retenção/absorção da umidade na camada, especialmente nas coberturas evapotranspirativas.
Temperatura	A elevação da temperatura do solo favorece as emissões dos gases (Park & Shin, 2001).
Coefficiente de permeabilidade	Parâmetro que mede a facilidade/dificuldade do gás atravessar o solo por advecção. Grandeza proporcional às emissões de gases.
Coefficiente de difusão	Parâmetro que mede a facilidade/dificuldade do gás atravessar o solo por difusão. Grandeza proporcional ao fluxo de gás emitido.
Contração/expansão e fissuras	Ciclos de umedecimento/secagem favorecem o aparecimento de fissuras em solos argilosos, aumentando os níveis de emissão.
Mineralogia	Possíveis reações físico-químicas dos minerais do solo com os gases podem retê-los na cobertura.

2.2.2 Camada metanotrófica

As camadas metanotróficas são utilizadas com o objetivo de reduzir as emissões de metano para a atmosfera.

A oxidação do metano na camada de cobertura ocorre devido a presença de bactérias metanotróficas, que consomem o metano na presença de oxigênio e produzem dióxido de carbono e água (MARIANO, 2008).



As bactérias metanotróficas utilizaram o metano como fonte de carbono no seu metabolismo com formação de água e de nova biomassa (MARIANO, 2008).

Em geral, as bactérias metanotróficas consomem cerca de 10-20% do CH_4 que percola pelo solo de cobertura (MACIEL, 2009).

Segundo ROSE (2009), vários fatores podem influenciar o potencial de oxidação destas camadas, tais como pressão atmosférica, quantidade de oxigênio disponível, teor de umidade, temperatura, concentração de metano na camada e o grau de compactação na camada de cobertura, entre outros.

Nos estudos observados por MACIEL (2009), além da umidade e temperatura do solo e da proporção de CH_4/O_2 no ambiente; o tipo de solo, a velocidade de percolação do gás, o pH, o teor de amônia, nitrito e matéria orgânica e presença de outras substâncias inibidoras são outros parâmetros que influenciam as taxas de oxidação.

Dentre os fatores possíveis de controlar (fatores não climáticos), LOPES (2009), destacou a umidade do material, devido a capacidade de difusão do metano no perfil do solo e pela atividade de bactérias metanotróficas, que geralmente são micro-organismos aeróbios.

No entanto, elevada umidade da camada de cobertura não garante maiores taxas oxidativas. Visto que existe um limite máximo no qual ocorre oxidação do metano, devido a anaerobiose dos solos alagados (ROSE, 2009).

Com relação a temperatura do solo, verificou-se que as taxas de oxidação crescem exponencialmente com a temperatura até 40°C (CZEPIEL *et. al.*, 1996 *apud* MACIEL, 2009).

A relação O_2 / CH_4 ideal para a otimização das atividades das metanotróficas é de 2:1 (equivalente a 2L de O_2 e 1L de CH_4) e a concentração mínima de O_2 requerida é de 3% (MACIEL, 2009).

A cobertura oxidativa tem um papel importante na redução de emissões fugitivas de metano nos aterros de resíduos sólidos do Brasil, onde os mesmos ainda são mal operados ou monitorados.

Nos estudos realizados em colunas, por ROSE (2009), a taxa média de oxidação de metano do composto de orgânico originado da compostagem da matéria orgânica presente nos resíduos sólidos urbanos foi 121% maior do que a taxa média do solo utilizado na confecção da camada de cobertura. A mistura de solo e composto na proporção de 1:1 também apresentou uma taxa média de oxidação 31% maior o solo estudado.

LOPES (2011) realizou ensaios em uma camada metanotrófica constituída de solo argiloso e composto orgânico de resíduos de podas (na proporção 1:1) e encontrou uma eficiência de oxidação de metano de 64,9%.

2.2.3 Barreira capilar

As barreiras capilares são coberturas superficiais que podem ser utilizadas para proteger da infiltração ou perda de água, taludes, aterros ou qualquer outro depósito granular (MARINHO, 2005).

Segundo WEIB & WITZSCHE (2005), a barreira capilar é um sistema constituído por dois materiais de granulometrias bem distintas, o solo mais fino forma uma camada capilar e o solo mais grosso, bloco capilar.

A barreira capilar funciona baseada na capacidade de retenção de água da camada capilar e a função do bloco capilar é proporcionar uma quebra hidráulica entre o material mais fino e o interior do aterro sanitário, desta maneira, a capacidade de retenção de água da camada superior da barreira capilar (material mais fino) será maior do que a camada inferior (material mais grosso) devido à diferença do potencial matricial dos dois materiais (IZZO *et. al.*, 2007).

Para McCARTNEY & ZORNBERG (2002), a novidade desta abordagem é o mecanismo que atua não como uma barreira, mas como uma esponja ou um reservatório de umidade, durante os períodos chuvosos, e nos períodos secos, libera-lo de volta para a atmosfera através da evapotranspiração.

Desta forma, as barreiras capilares servem para amenizar a variabilidade das interações solo-atmosfera (MARINHO, 2005).

Sob condição não saturada, o solo granular abaixo do solo fino apresenta baixo teor de umidade volumétrica e, conseqüentemente, baixa condutividade hidráulica não saturada que limita o movimento de fluxo de água descendente da camada de solo fino (ALMEIDA, 2011).

A eficiência da barreira capilar está ligada à capacidade de retenção e distribuição de água nos poros, ou seja, ao fenômeno da capilaridade nos solos (VIEIRA, 2005). Forças capilares retêm a água na camada de solo fino até que o solo próximo à interface aproxime-se da saturação. Se a saturação da camada de solo fino ocorre, a água se moverá relativamente rápido através da camada de solo granular e de resíduos (CATAPRETA, 2008).

Essas camadas ainda podem ser inclinadas de modo que a água infiltrada seja desviada para um sistema de drenagem (ALMEIDA, 2011).

Em aterros de resíduos, essas camadas possuem duas funções básicas: uma é limitar a quantidade de água que atinge as camadas de resíduos, reduzindo a lixiviação de material; a outra função é reduzir a entrada de oxigênio, que pode reagir quando em contato com alguns resíduos, aumentando a produção de contaminantes (VIEIRA, 2005).

Em climas com elevada precipitação a eficiência da barreira capilar é reduzida em relação ao uso da camada convencional, no entanto, quando se trata de climas áridos e semi-áridos a eficiência das barreiras capilares já tem sido comprovada em alguns estudos (MARINHO, 2005).

As vantagens adicionais desse tipo de cobertura com relação aos sistemas convencionais de argila compactada é sua invulnerabilidade à dessecação e rachaduras durante e após a instalação (McCARTNEY & ZORNBERG, 2002).

2.3 Fluxo em solos não saturados

O fluxo em um meio poroso não-saturado ocorre quando algum fluido (água, ar e contaminantes líquidos e gasosos) se movimenta através de um solo com grau de saturação inferior a 100%, com partes dos espaços vazios ocupados pelo ar (MONCADA, 2004).

De acordo com FREDLUND & RAHARDJO (1993) a lei de Darcy também se aplica aos solos não saturados.

No entanto, o coeficiente de permeabilidade não pode ser considerado uma constante, pois varia com a quantidade de água no solo, que pode ser colocada em termos de conteúdo de umidade gravimétrica, grau de saturação ou umidade volumétrica.

Desta forma, o fluxo de água varia com a sucção existente na matriz do solo (LOPES, 2011).

Segundo MARINHO (1997), a sucção pode ser definida como a pressão isotrópica da água intersticial, fruto de condições físico-químicas, que faz com que o sistema água/ solo absorva ou perca água dependendo das condições ambientais, aumentando ou reduzindo o grau de saturação.

A sucção dos solos é composta por duas parcelas: a matricial e a osmótica. A componente matricial está relacionada com a matriz do solo, ou seja, ao tipo de partículas e seu arranjo estrutural, e a componente osmótica, está relacionada à concentração química da água do solo (MONCADA, 2004).

Segundo LOPES (2011), a sucção varia de acordo com a presença de água nos poros do solo e quando o solo está com baixa umidade, a afinidade em absorver água é grande e por isso a sucção é alta. Em estudos realizados por JUCÁ (1990), em solos com elevada umidade ou saturação, sucção apresentou tendência a decrescer.

A relação entre o teor de umidade e a sucção é representada graficamente através da curva característica do solo. O formato da curva depende de vários fatores inerentes ao solo (tais como: estrutura, textura, tipo de solo, histórico de tensões, teor de umidade, índice de vazios e método de compactação) e a modelagem das curvas.

A sucção em que acontece a entrada de ar representa um valor que acima do qual o ar se faz presente na estrutura do solo (LOPES, 2011).

A curva característica pode ser utilizada para fornecer parâmetros importantes para a descrição do comportamento do solo não saturado, tais como o coeficiente de permeabilidade, resistência ao cisalhamento, variação do volume, transporte de contaminantes na zona não saturada; em geral a relação entre estes parâmetros e a sucção é feita em termos de sucção mátrica (MONCADA, 2004).

Para fluxo de gás em solos não saturados, o teor de umidade é um fator primordial, visto que, quando acontece um acréscimo na umidade do solo, o volume de água nos poros vai aumentar, provocando uma diminuição na permeabilidade do solo ao ar, tendo em vista que a quantidade e a continuidade dos poros aerados ficam reduzidas (MACIEL, 2003).

Um dos modelos matemáticos que fazem a previsão da variação da permeabilidade ao ar em função da saturação é o modelo de van GENUCHTEN (1980), que realiza a previsão de fluxo de ar, utilizando o conceito de saturação efetiva e parâmetros empíricos obtidos na curva de retenção de água.

A permeabilidade de um solo compactado, utilizado na camada de cobertura final de um aterro de resíduos sólidos, é de extrema importância na redução do fluxo de água dentro do Aterro e do fluxo de gás para a atmosfera (MARINHO, 2005).

Em camadas de cobertura de aterros de resíduos sólidos o fluxo é essencialmente multifásico, envolvendo a fase água e fase gás que inclui o metano, gás carbônico, oxigênio, nitrogênio e vapor d'água (LOPES, 2011). Com o objetivo de simular tal comportamento, HETTIARATCHI & PERERA (2009) descreve um modelo matemático unidirecional (vertical) onde as emissões fugitivas de biogás é controlada pelo gradiente de pressão entre o gás do aterro e a superfície externa da camada de cobertura, da permeabilidade do solo ao gás e das características tais como presença de microorganismos metanotróficos e porosidade.

2.4 Emissões fugitivas de biogás em ARSU

Em aterros de resíduos sólidos o gás mais estudado é o metano, devido ao seu poder poluidor e sua contribuição para o efeito estufa, bem como a possibilidade de aproveitamento energético.

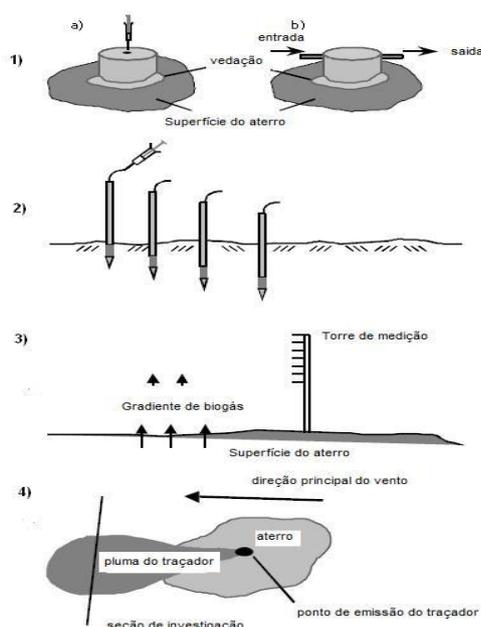
As emissões fugitivas de biogás podem ser reduzidas se o sistema de drenagem de gases e a camada de cobertura estiverem cumprindo suas funções, visto que o bom funcionamento dos drenos de biogás juntamente com a baixa permeabilidade da camada de cobertura a passagem do gás, resulta no fluxo preferencial do biogás pelo sistema de drenagem. Dependendo da eficiência da extração, a redução das emissões pode atingir 35% a 90% (SPOKAS et.al., 2006 *apud* LOPES, 2011).

Essa extração pode se dá de forma natural ou forçada. E o biogás retirado da massa de resíduos pode ser queimado ou usado como fonte de energia. Normalmente, a eficiência de coleta situa-se num intervalo de 40 a 90% (HETTIARATCHI & POKHREL, 2003 *apud* LOPES, 2011).

Outro critério operacional bastante importante é a confecção de uma eficiente camada de cobertura final. BOGNER *et. al.*, (1997) cita um conjunto de variáveis do solo tais como textura, umidade e temperatura, como os principais fatores a ser analisados em estudos de emissões em camadas de cobertura.

Existem diversos métodos para determinação de emissões de metano, como mostra a Figura II.4.

Figura II.4: Técnicas de Medição de Emissões: 1) Técnica de Placa de fluxo: a) estática b) dinâmica; 2) Gradiente de concentração subsuperficial; 3) Método Micrometeorológico; 4) Traçador e pluma de dispersão (Adaptado de FISCHER, 1999).



Algumas técnicas são usadas para estimar as emissões de pequenas áreas definidas e, assim, fornecer emissões "pontuais" de biogás, enquanto outras técnicas permitem a estimativa global de fluxos para áreas maiores, como por exemplo, para um aterro inteiro (LOPES, 2010), como mostra a Tabela II.6.

Tabela II.6. Características gerais dos métodos de investigação de emissões (MACIEL, 2009).

Métodos	Características principais
Placas de fluxo (estática e dinâmica)	<p>Avaliação da concentração do gás no interior da placa (volume e área pré-determinados) durante um intervalo de tempo. No modelo dinâmico, os gases no interior da placa são diluídos através de um fluxo contínuo de ar para serem em seguida analisados e por fim dispersados na atmosfera. No método estático, os gases são analisados sem diluição e retornam em seguida para a placa em um ciclo fechado.</p> <p>No caso das placas estáticas, o fluxo é calculado da seguinte forma:</p> $J_{CH_4} = \frac{V_p \times \rho_{gás} \times \Delta C}{A \times \Delta t}$ <p>Em que: V_p = volume útil da placa de fluxo (m^3), A = área de solo coberta pela placa (m^2), $\rho_{gás}$ = massa específica do gás à determinada temperatura (kg/m^3) e $\Delta C/\Delta t$ = variação da concentração do gás (% vol.) com o tempo (s). O fluxo (J) é expresso em unidades de $kg/m^2.s$.</p>
Gradientes sub-superficiais (tubos de inspeção)	<p>Este método é baseado na 1ª Lei de Fick. A difusividade do gás no solo pode ser calculada empiricamente ou medida <i>in situ</i> e a variação da concentração do gás com a profundidade da camada pode ser obtida por meio de tubos de inspeção. De acordo com Fischer <i>et. al.</i> (1999), quando comparado com as placas de fluxo, os resultados obtidos neste método são um pouco superiores. O fluxo pode ser superestimado se houver entradas de ar ou o gás oxidar na parte superior da cobertura. Outra desvantagem é que só é considerada a parcela de fluxo difusivo. O fluxo pode ser calculado pela expressão:</p> $J_{CH_4} = D_s \times \frac{\Delta C}{\Delta x}$ <p>Em que: D_s = difusividade gás-solo (m^2/s) e $\Delta C/\Delta x$ = variação da concentração do gás (g/m^3) em função da espessura da camada (m). O fluxo (J) é expresso em unidades de $g/m^2.s$.</p>
Pluma de contaminação (dispersão gases)	<p>Este método envolve a emissão (taxa pré-determinada) de um gás traço (ex. SF_6 ou N_2O) do aterro e o monitoramento da concentração do gás traço e do gás de interesse (ex. CH_4) a jusante de forma a mapear a pluma de dispersão. A pluma pode ser avaliada por detectores (Flame Ionisation Detector – FID) ou por espectroscopia de absorção em infravermelho (Fourier Transform Infra-Red – FTIR). O fluxo é determinado pela seguinte expressão (Scheutz <i>et. al.</i>, 2007), em que: J é o fluxo, C é a concentração e M o peso molecular dos gases:</p> $J_{CH_4} = J_T \times \frac{C_{CH_4} \times M_{CH_4}}{C_T \times M_T}$ <p>Alguns autores utilizam o FTIR para avaliar a concentração do CH_4 por meio de feixes paralelos sobre a superfície do aterro e aplicando um modelo de dispersão Gaussiana para traçar o mapeamento. Neste caso, não é utilizado gás traço.</p>
Termografia em infravermelho	<p>Utiliza uma câmara de infravermelho para detectar regiões ou pontos com temperatura distinta. Não permite determinar as taxas de emissões, apenas localizar as regiões de pico de fluxo no aterro.</p>

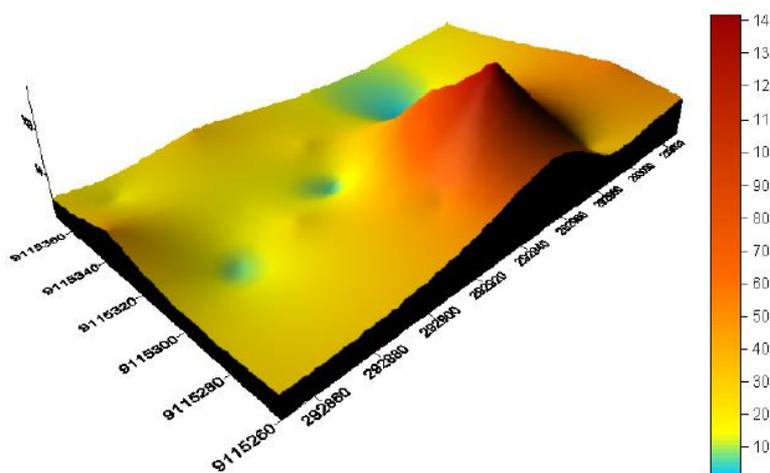
A técnica de placa de fluxo e medições de gradiente vertical é a mais utilizada para estimativas mais pontuais, enquanto que métodos micrometeorológicos, fracionamento isotópico, técnicas de marcadores e espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier são mais utilizadas para estimativas globais (FISCHER, 1999).

MACIEL (2003) relatou que o método de placa de fluxo é mais preciso na determinação da emissão pontual, possui larga experiência prática, baixo custo, simples instalação, não necessita mão de obra muito especializada, possibilita a determinação de parâmetros do solo (permeabilidade, peso específico, umidade, temperatura, etc) e permite avaliação simultânea de diversos gases. Por outro lado, necessita de inúmeros ensaios para obtenção da emissão total do aterro, possui uma duração prolongada (30 min. a 3 horas) a depender das dimensões da placa e pode causar modificação nas características da cobertura devido a cravação da placa.

O método de investigação de placa de fluxo estática vem sendo utilizado amplamente no Brasil, o mesmo não acontece com a tecnologia de infravermelho (MACIEL, 2009).

Para se extrapolar os resultados pontuais em cobertura de aterros de resíduos pode se utilizar a técnica de subdivisão de toda área superficial do aterro em malhas quadradas, com espaçamento bem definido e assim proceder a ensaios individuais em cada uma das subáreas não existindo um espaçamento ótimo, tendo-se que ajustar de acordo com as peculiaridades de cada aterro (MACIEL, 2003). Essas emissões também podem ser apresentadas com efeito tridimensional, de acordo com a localização dos pontos medidos como mostrados por MARIANO (2008) através do uso de software SURFER® na Figura II.5.

Figura II.5: Emissões de metano do aterro de Aguazinha-Olinda-PE (MARIANO, 2008).



A ENVIRONMENT AGENCY (2004) recomenda que o número de ensaios em áreas superiores a 5.000 m² deve ser calculado com base na expressão: $n = 6 + 0,15 \times A^{0,5}$, onde n é o número de ensaios e A é área do aterro investigada em m². Para áreas menores que 5.000 m², o número de ensaios deve ser: $n = A / 5.000 \times 16$ com no mínimo de 6 ensaios. Desta forma, pode observar que o número de ensaios e o espaçamento entre os mesmos (malha ou “grid”) depende do tamanho da área analisada.

No estudo realizado por BOECKX *et. al.* (1996) na Bélgica, as emissões de metano, em uma camada de cobertura convencional de cerca de 30 cm de solo argiloso, foram de -0,0059 a 0,91 g/m².dia, tendo emissões de CH₄ mais elevadas no verão (junho-setembro) do que no outono (outubro-dezembro).

Também para um solo argiloso, com espessura entre 25 e 90 cm, MACIEL (2003) encontrou emissões de CH₄ que variaram de 102 a 363 g/m².dia, sendo relacionadas com a inexistência de drenagem interna de biogás, elevada produção de biogás (resíduos com menos de 5 anos) e falta de controle da compactação na execução da camada de cobertura.

MARIANO (2008) realizou ensaios de placa de fluxo em uma célula de resíduos sólidos com idade dos resíduos aterrados, espessura e tipo de solo da camada de cobertura bastante semelhante à de MACIEL (2003). As emissões de CH₄ variaram de 0 a 401 g/m².dia.

Na investigação de LOPES (2011), a camada convencional apresentou emissões 6 vezes superior às camadas metanotrófica e barreira capilar, embora com maior espessura de solo. A faixa de variação de emissão de metano (excluindo-se os picos em função de fissuras) na camada de cobertura convencional, foi de 0 a 250 g/m².dia e nas demais camadas foi de 0 a 40 g/m².dia.

De acordo com a ENVIRONMENT AGENCY (2004) a média das emissões superficiais de CH₄ em aterros com cobertura final implantada não deve ser superior a 0,086 g/m².dia e aterros com cobertura intermediária ou temporária o limite médio é de 8,64 g/m².dia.

A Tabela II.7 também mostra alguns valores de fluxo de metano medidos por meio de placa de fluxo estática, em diferentes locais do estudo, espessura da camada e o tipo de material utilizado.

Tabela II.7. Fluxo de CH₄ em camadas de cobertura de aterros de resíduos sólidos reportados na literatura
(Adaptado de LOPES, 2011).

Referência	Cobertura	Extração de biogás	Período de análise	Fluxo de CH ₄ (g/m ² .dia)
BOECKX <i>et. al.</i> (1996)	0,3 m de solo com cobertura vegetal e arbustos	Não	Jun/94 a Dez/94	-0,0059 a 0,91
BORJESSON & SVENSSON (1997)	0,1 a 0,8 m de solo arenoso	N.I.	Mai/92 a Jul/94	-0,3 a 18,4
PARK & SHIN (2001)	0,5 a 0,7 m de areia siltosa	Sim	N.I.	0 a 14.794
MACIEL (2003)	0,25 a 0,90 m de solo compactado	Não	Mar/03 a Mai/03	102 a 363
SCHEUTZ <i>et. al.</i> (2003b)	0,4 m de areia grossa sobreposto de 0,8 m de solo argiloso	Sim	set/01	-0,01 a 10
HUBER-HUMER (2004)	0,9 m de composto de lodo de esgotos sobreposto de 0,3 m de cascalho	Sim	Jul/99 a Set/01	-0,5 a 2,1
	0,9 m de composto de RSU sobreposto de 0,3 m de cascalho	Sim		-3,3 a 5,6
	0,4 m de composto de lodo de esgotos sobreposto de 0,3 m de cascalho	Sim		0 a 706,8
	0,3 m de composto de lodo de esgoto sobreposto de 0,3 m de solo compactado	Sim		0,2 a 173,9
	Superfície de aterro descoberto (ref.)	Sim		0,3 a 1181,0
FOURIE & MORRIS (2004)	0,1 m de areia argilosa	Não	Mar/99 e set/99	-45,0 a 638,0
	0,1 a 0,6m de areia argilosa e argila de baixa plasticidade	N.I.	mar/99	0 a 410,0
	0,1 a 0,2 m de areia siltosa	N.I.	mar/99	0 a 347,0
	0,15 a 0,6 m de areia siltosa argilosa	N.I.	mar/99	0 a 385,0
MCBAIN <i>et. al.</i> (2005)	0,5 a 1,5m de argila compactada	Não	Jun/02 a Ago/02	7,0 a 39,0

Referência	Cobertura	Extração de biogás	Período de análise	Fluxo de CH ₄ (g/m ² .dia)
ABICHOU <i>et. al.</i> (2006b)	0,3 a 0,6 m de solo argiloso	Não	Jun/03 a set/03	-14,0 a 1.755,0
	0,45 m de solo em talude	Não	Jun/03 a Jul/03	2,0 a 63,0
	0,15 a 0,30 cm de solo (cobertura diária)	Não	Jun/03 a Nov/03	0 a 521,0
	0,45 m de solo em talude	Não	Set/03 a Fev/04	-6,1 a 343,0
LOHILA <i>et. al.</i> (2007)	Fina camada de RCD*	Sim	Jun/03 a Dez/03	0 a 259,2
AKERMAN <i>et. al.</i> (2007)	1 m de cinzas e 0,3 de argila ou calcáreo	Sim	2005	0 a 15,2(a)
	0,5 a 0,7 m de argila	Sim	2005	0 a 38,0(a)
	0,5 m Argila (0,5 – 1m) + Solo	Sim	2005	0 a 2,0 (a)
ZHANG <i>et. al.</i> (2008)	0,8 a 1,0 m de solo franco arenoso	Sim	Nov/06 a Jun/07	7,0 ± 22,0
	0,8 a 1,0 m de solo franco arenoso	Sim	Mar/06 a Jun/07	14,0 ± 35,0(b)
	0,8 a 1,2m de solo franco	Sim	Mar/06/ a Jun/07	5,0 ± 12,0(c)
MARIANO (2008)	0,25 a 0,9 m de solo areno argiloso	Não	Mar/06 a Nov/07	0,0 a 401,0
ABICHOU <i>et. al.</i> (2009)	0,2 a 0,6 de argila arenosa sobreposta de 0,2 a 0,5 de areia fina	Não	Jan/05 a Dez/05	< 14,0
	1,10 m de composto sobreposto de 0,10 m de dreno de gás	Não	Jan/05 a Dez/05	Até 0,04
LOPES (2011)	0,70 m de solo siltoso	Não	Ago/08 a Mar/10	2,10 a 984,7
	0,30 m de solo siltoso sobreposto de 0,30 m de mistura de solo e composto orgânico (1:1)	Não		0 a 151,0
	0,20 m de pedra britada sobreposta de 0,50 m de camada de solo siltoso	Não		0 a 63,4

CFE = Placa de fluxo Estática; TFD: Túnel de Fluxo dinâmico; MM: Método micro meteorológico; *RCD: resíduos de construção e demolição; **0,2 – 0,5 m de cobertura superficial e 0,5 – 2,0m de argila compactada e diatomácea; (a) obtido do gráfico (b) com irrigação e recirculação de lixiviado; (c) irrigação de lixiviado; N.I. Não informado

CAPÍTULO III – MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo descreve a área de estudo, as metodologias adotadas e os equipamentos utilizados nos ensaios realizados em laboratório e em campo.

A área de estudo é célula experimental da Muribeca, localizada no município de Jaboatão dos Guararapes-PE, que foi implantada, em 2007, como parte de um projeto de pesquisa que estuda geração de energia elétrica através do biogás produzido pela biodegradação dos resíduos sólidos urbanos. Tal projeto foi financiado pela Companhia Hidro Elétrica do São Francisco (CHESF) em uma área específica disponibilizada pela Empresa de Limpeza Urbana do Recife (EMLURB), no Aterro Controlado da Muribeca, PE, e que é monitorada pelos técnicos do Grupo de Resíduos Sólidos da Universidade Federal de Pernambuco (GRS/UFPE), desde Janeiro de 2008.

Os ensaios de laboratório realizados nesta investigação foram à caracterização geotécnica das amostras retiradas das camadas de coberturas para a obtenção das propriedades atuais das camadas. São eles: composição granulométrica, limites de liquidez e plasticidade, ensaio de compactação, determinação da curva característica do solo e permeabilidade ao ar.

Os ensaios de campo contemplados nesta pesquisa foram às medições das emissões de biogás pelo sistema de drenagem vertical e das emissões fugitivas pela camada de cobertura, e medição da concentração dos gases no contato cobertura/resíduo.

As emissões do sistema de drenagem biogás fazem parte do monitoramento ambiental da célula experimental da Muribeca, elaborado por MACIEL (2009) e executado desde de Janeiro de 2008.

As medições de emissões fugitivas na referida Célula teve início em Setembro de 2008, nas pesquisas realizadas por MACIEL (2009) e LOPES (2011).

Para esta pesquisa, as medições das emissões pelos drenos e fugitivas foram realizadas no período de Setembro de 2010 a Janeiro de 2011 e de Abril a Junho de 2012. Para o mesmo período foram feitas medições de pressão e concentração dos principais gases que compõe o biogás proveniente da decomposição de resíduos sólidos urbanos aterrados (CH_4 , CO_2 e O_2) na interface cobertura/resíduo.

3.1 Área de estudo

Este estudo foi realizado na célula experimental da Muribeca, localizada no Aterro Controlado de mesmo nome, no município de Jaboatão dos Guararapes, Pernambuco.

O Aterro da Muribeca possui uma área de 60 hectares e uma quantidade de resíduos estimada em mais 11 milhões de toneladas, recebia diariamente cerca de 2.400 t de RSU dos municípios de Recife, Jaboatão dos Guararapes, Moreno e particulares quando foi fechado em julho/2009 (MACIEL, 2009).

A célula experimental (Figuras III.1) possui uma área de base de 5.993 m² e altura máxima de 9 metros, distribuída em dois patamares com três e seis metros de altura. A capacidade de RSU da célula é de aproximadamente 37 mil toneladas. A geometria dos taludes da célula foi executada com declividade 1(V):2(H), com o objetivo de proporcionar uma maior estabilidade geotécnica (MACIEL, 2009).

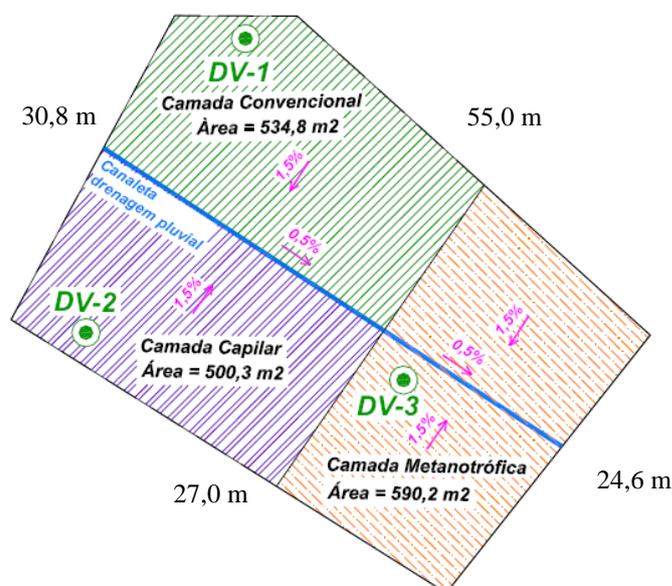
Figura III.1: Vista aérea frontal do Aterro Controlado da Muribeca com a localização da célula experimental (GOOGLE MAPS, 2012).



3.2 Tipos de camadas de cobertura da célula experimental

A camada de cobertura dos taludes e da berma foi do tipo convencional, constituída com cerca de 0,60 m de solo compactado, enquanto a cobertura do platô superior foi dividida em três regiões com diferentes composições de materiais para avaliação da eficiência de retenção do biogás na camada final (MACIEL, 2009). A Figura III.2 apresenta a distribuição das três camadas existentes na região superior da célula, pode-se observar também a área de abrangência de cada camada, além da drenagem pluvial feita em canaleta de concreto ($\varphi = 30$ cm) na parte central e os caimentos transversal (1,5%) e longitudinal (0,5%) da cobertura para escoamento superficial. A drenagem das canaletas lança as águas numa única descida do tipo gabião, que capta toda água do platô superior.

Figura III.2: Distribuição dos três tipos de cobertura na camada superior da célula experimental (MACIEL, 2009).

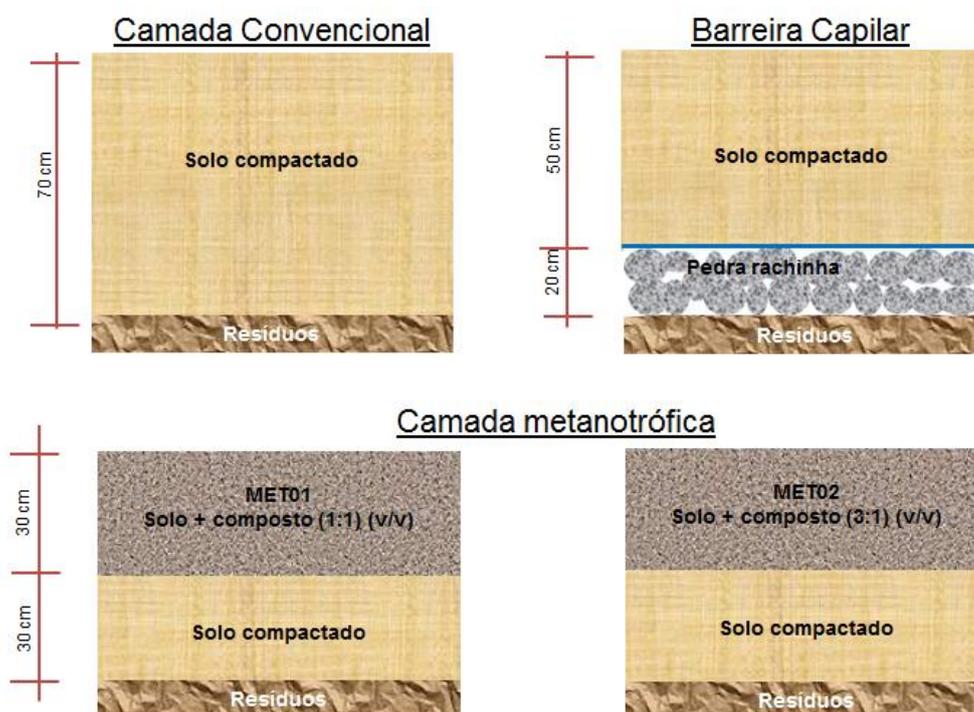


A Figura III.3 apresenta a composição e variações de espessura das camadas, são elas:

- Camada convencional, constituída apenas de solo compactado;
- Camada tipo barreira capilar, constituída por uma camada de pedra britada ($\varphi \cong 0,1$ m) com espessura de 0,20 m sobreposta por uma camada de solo. Na interface entre a pedra britada e o solo foi utilizado geotêxtil tipo Bidim com gramatura de 200 g/m^2 . De acordo com LOPES (2011), o geotêxtil possui uma permeabilidade semelhante à de uma areia média a grossa, e funcionou como elemento de mudança de permeabilidade em relação ao solo compactado.

- Camada metanotrófica, composta em duas partes: a parte inferior constituída com solo compactado e a superior com mistura de solo e composto de podaço (nas proporções de 1:1 e 3:4). O composto utilizado na cobertura foi obtido da Unidade de Compostagem existente no Aterro da Muribeca e possuía frações distribuídas da seguinte forma: 34,7% com dimensões de areia fina, 52,4% de areia média, 7,3% com granulometria de areia grossa e menos de 1,0% a fração fina (MACIEL, 2009).

Figura III.3: Perfis das camadas experimentais na região superior da Célula (LOPES, 2011).



É importante lembrar que o solo utilizado nos três tipos de cobertura foi retirado de uma mesma jazida e segundo MACIEL (2009) pode ser classificado, de acordo com o Sistema Unificado de Classificação dos Solos (SUCS), como solos areno-argilosos ou areno-siltosos, como mostra a Tabela III.1.

Tabela III.1: Caracterização do solo da cobertura superior da célula experimental em 2008 (MACIEL, 2009)

ANÁLISES		AMOSTRA 1	AMOSTRA 2	AMOSTRA 3
Granulometria	Argila (%)	33	23	15
	Silte (%)	20	23	22
	Areia fina (%)	24	32	35
	Areia média (%)	21	20	25
	Areia grossa (%)	1	1	1
	Pedregulho (%)	1	1	2
Limites de consistência	LL (%)	48,02	N.D.	N.D.
	LP (%)	36,84	N.D.	N.D.
	IP (%)	11,18	N.D.	N.D.
Densidade seca - ρ_s (g/cm ³)		1,678	1,713	1,697
Umidade ótima - $w_{ót}$ (%)		11,82	17,22	13,67
Permeabilidade saturada - K_{sat} (m/s)		$3,6 \times 10^{-6}$	$4,4 \times 10^{-7}$	$3,6 \times 10^{-6}$
Classificação do sistema unificado		ML	SM	SM

N.D.: Não determinado

A Tabela III.1 apresenta os resultados da caracterização de três amostras de solo da camada de cobertura superior da célula experimental, coletadas durante a fase de espalhamento e compactação da camada, em Fevereiro de 2008.

3.2 Caracterização geotécnica do solo das camadas de cobertura

3.2.1 Ensaios de caracterização geotécnica

Para a realização dos ensaios de caracterização coletou-se quatro amostras amolgadas de cada camada de cobertura e para a determinação dos limites de liquidez e plasticidade e compactação, uma amostra de cada camada, como mostra a Figura III.4. Todos os materiais foram levados ao Laboratório de Solos da UFPE, para caracterização a partir das normas padronizadas da ABNT:

- NBR 6457/86: Amostra de Solo - Preparação para Ensaios de Compactação e Ensaios de Caracterização (ABNT, 1986a);
- NBR 6508/84: Grãos de Solos que Passam na Peneira de 4,8mm – Determinação da Massa Específica dos grãos (ABNT, 1984a);
- NBR 7181/84: Análise granulométrica para solos (ABNT, 1984b), com determinação de diâmetro correspondente a cada fração de material de acordo com a norma NBR 6502/1995 – solos e rochas (ABNT, 1995);
- NBR 6459/84: Solo – Determinação do Limite de Liquidez (ABNT, 1984c);
- NBR 7180/84: Solo – Determinação do Limite de Plasticidade (ABNT, 1984d)
- NBR 7182/86: Solo - Ensaio de Compactação utilizando energia de compactação normal (ABNT, 1986b)

Figura III.4: Coleta de amostras amolgadas



Para realização dos ensaios de sucção e permeabilidade à água e ao ar retirou-se uma amostra indeformada de cada camada, em moldes de PVC de 0,10 m de diâmetro e 0,15 m de altura (Figura III.5).

Figura III.5: Coleta de amostras indeformadas



3.2.2 Ensaio de membrana de pressão

Para obtenção das curvas características utilizou-se o ensaio de membrana de pressão, conforme apresentado na Figura III.6.

Figura III.6: Ensaio de membrana de pressão: (a), saturação dos corpos de prova e da membrana, (b) colocação da membrana na base do equipamento, (c) colocação do corpo de prova na célula, (d) colocação de ligas de borracha para maior fixação, (e) fechamento da célula para aplicação da sucção, (f) início do ensaio.



O procedimento do ensaio de membrana de pressão foi realizado segundo LAFAYETTE (2000) e seguiu as seguintes etapas:

- regularizam-se os corpos de prova no molde, retirando-se o excesso de solo com a ajuda de uma espátula;
- pesa-se e mede-se as dimensões do corpo de prova,
- satura-se a pedra porosa e da base da membrana;
- corta a membrana nas mesmas dimensões da base do equipamento, onde em seguida é colocada na célula sem ar entre ela e a pedra porosa;
- coloca-se o corpo de prova na célula;
- fecha a célula com aplicação de sucção, regulada no tubo de nitrogênio;
- retira-se as presilhas das torneiras para passagem da água;
- regula a sucção aplicada na célula (4 a 6 dias);
- retira-se o corpo de prova da membrana e pesagem;
- seca a amostra em estufa por 24 horas para determinação da umidade final.

As pressões utilizadas no ensaio para obter a sucção do solo e conseqüentemente, a curva característica, foram: 50, 100, 200, 500 e 1000 KPa.

3.2.3 Ensaio de permeabilidade

O ensaio foi realizado segundo a norma ASTM D5084-10 (ASTM, 2010), em permeâmetro de parede flexível modelo Tri-flex 2 da Soil Test – ELE, mostrada na Figura III.7.

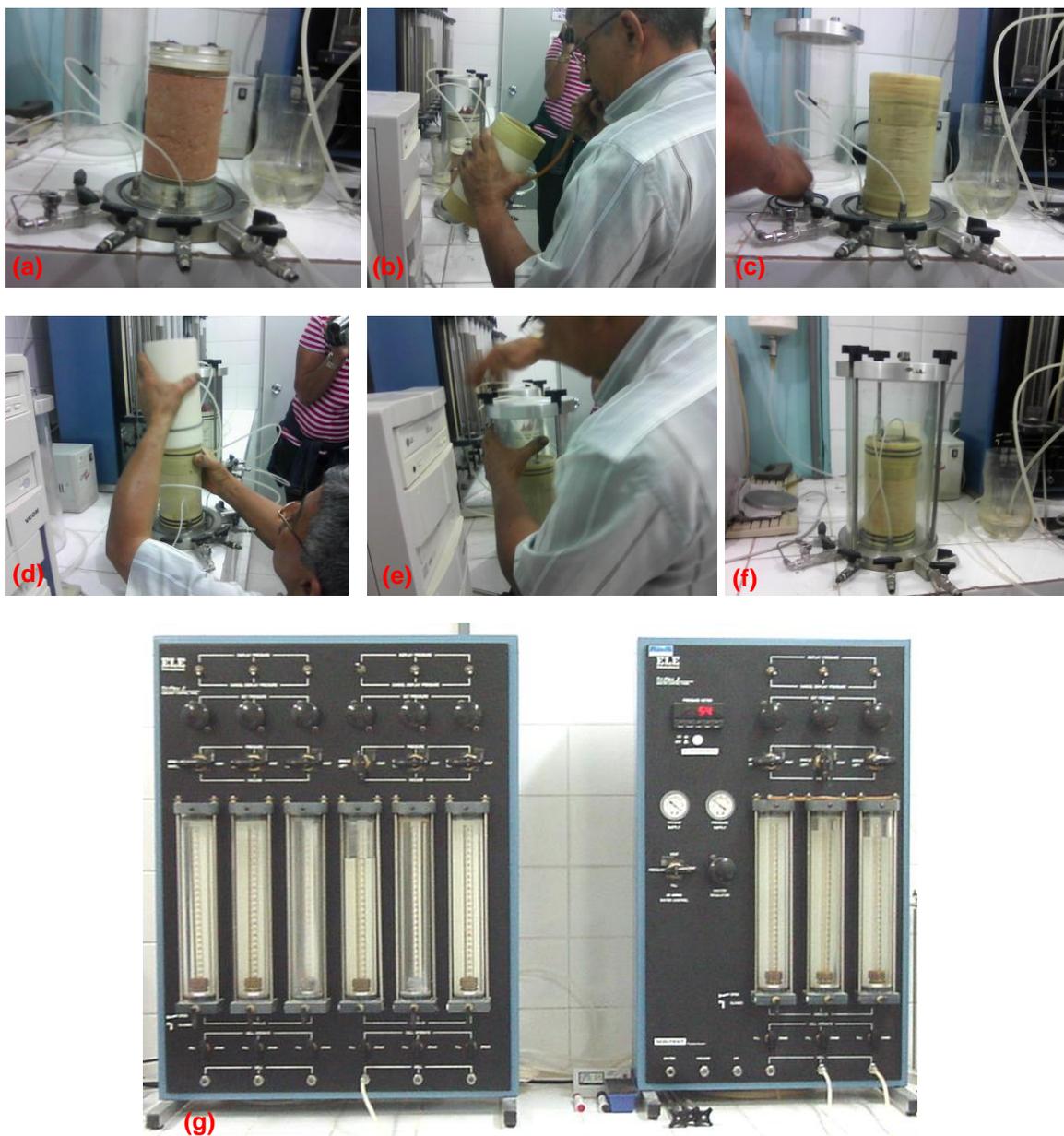
Os procedimentos adotados para a realização deste ensaio foram os mesmos realizados por LOPES (2011):

- regulariza-se os corpos de prova no molde, retirando-se o excesso de solo com a ajuda de uma espátula;
- mede-se as dimensões do corpo de prova,
- coloca-se tanto na base quanto no topo do corpo de prova um conjunto de pedras porosas e papel filtro em contato como solo, com posicionamento na parte superior de uma tampa de acrílico denominado “top cap” onde são conectadas as mangueiras de drenagem;
- faz-se o encamisamento do corpo de prova, com uma membrana e ligas de borracha, para melhorar a fixação e oferecer segurança lateral do corpo de prova, evitando seu contato lateral com a água;

- coloca-se o corpo de prova dentro da célula de acrílico;
- conecta-se a célula de acrílico ao aparelho através das tubulações, e posterior abertura da válvula lateral, permitindo a entrada de água até encher a célula, verificando-se se no final não existem bolhas de ar na superfície.
- aplica-se uma pressão confinante de 50 kPa e em seguida faz-se a remoção de ar das pedras porosas e das linhas das tubulações, drenando o sistema com água destilada até que todas as bolhas de ar desapareçam das tubulações;
- enche-se com água o canal da bureta até que as três buretas estejam com o nível desejado;
- realizar-se a desaeração da bureta removendo a entrada de ar (quando não houver bolhas de ar perceptíveis);
- aumenta-se a pressão confinante para 108 kPa na amostra até a saturação;
- fecha-se as válvulas de entrada de pressão no topo e na base do corpo de prova, e em seguida posicionam-se as válvulas de comando em “pressure” (no equipamento) para então serem aplicadas as pressões de base e de topo.
- abre-se todas as válvulas de entrada de pressão;
- a cada 24 horas verifica-se se o corpo de prova está saturado, considerando o critério de que o volume de d’água que entra pela base da amostra seja o mesmo que saia pelo topo, na aplicação de um gradiente de pressão constante de 30 kPa (geralmente a saturação se dá em média de 1 a 2 dias);
- após ser constatado que o corpo de prova encontra-se saturado, realiza-se o ensaio de permeabilidade propriamente dito;
- fecham-se as válvulas de pressão de topo e de base;
- coloca-se um gradiente de fluxo ascendente de 30 kPa;
- abrem-se as válvulas de topo e de base da célula e mede-se o tempo necessário para percolar 5 cm^3 pela amostra;
- repete-se do procedimento até que se tenha pelo menos três leituras de tempo com variação de até $\pm 5\%$;
- realiza-se a secagem da amostra em estufa a 65°C até peso constante, para se determinar a permeabilidade máxima ao ar;
- repete-se a metodologia de montagem do corpo de prova utilizada para a determinação da permeabilidade saturada, trocando-se o fluido confinante e percolante por ar atmosférico. As pressões aplicadas pelo permeâmetro provêm de um compressor de ar e são reguladas no quadro de comando do equipamento. Para cada amostra foram feitas 3 leituras de vazão de ar, adotando-se a média dos resultados para a determinação da permeabilidade ao ar. A leitura da vazão de ar percolada através da amostra, para cada

gradiente de pressão aplicado, foi feita diretamente em um rotâmetro modelo série 1900 da ApliTech, tubo 2300, com faixa de leitura 0 a 10 NI/h e erro de 5%.

Figura III.7: Ensaio de permeabilidade: (a) colocação de pedras porosas e papel filtro no topo e na base do corpo de prova, (b) retirada do ar da membrana que irá envolver o corpo de prova, (c) encamisamento do corpo de prova, (d) colocação de ligas de borracha para maior fixação, (e) colocação e fechamento do célula de acrílico, (f) início do ensaio, (g) equipamento utilizado no ensaio.



A partir dos resultados do ensaio de permeabilidade à água determina-se o coeficiente de permeabilidade saturada (K_{sat}) utilizando-se a Equação III.1:

$$K_{sat} = \frac{V \times L}{\Delta P \times t \times A_{cp}}$$

Equação III.1

Onde:

- K_{sat} = coeficiente de permeabilidade à água (m/s)
- V = Volume do líquido percolado (m^3)
- L = Altura do corpo de prova (m)
- ΔP = Variação da carga de pressão (m)
- t = Tempo necessário para percolar o volume de 5 ml (s)
- A_{cp} = Área do Corpo de Prova (m^2)

Para determinação da permeabilidade ao ar utilizou-se a Equação III.2 e a equação formulada a partir da Lei de Darcy que considera o efeito da compressibilidade do fluido.

$$k_{int} = \frac{2 \times v \times \mu \times L \times P_s}{(P_e^2 - P_s^2)}$$

Equação III.2

Onde:

- K_{int} = Permeabilidade intrínseca do fluido (m^2)
- v = Velocidade de percolação do fluido (m/s)
- μ = viscosidade dinâmica do ar (Pa.s)
- L = comprimento da amostra (m)
- P_e = Pressão de entrada (Pa)
- P_s = Pressão de saída (Pa)

3.3 Emissões de biogás

3.3.1 Emissões pelo sistema de drenagem vertical

As medições das emissões pelo sistema de drenagem teve início após o enchimento e a geometrização da célula experimental da Muribeca e vêm sendo realizado desde 2008.

A determinação da vazão é baseada na Norma BSI 1042-2.3 – 19984 – Medição do fluxo de fluídos em condutos fechados. Método velocidade área. Métodos de medição de vazão em condições de fluxo turbulento ou assimétrico em dutos circulares (Equação III.3), onde:

$$Q = (v \times A) \times 3600$$

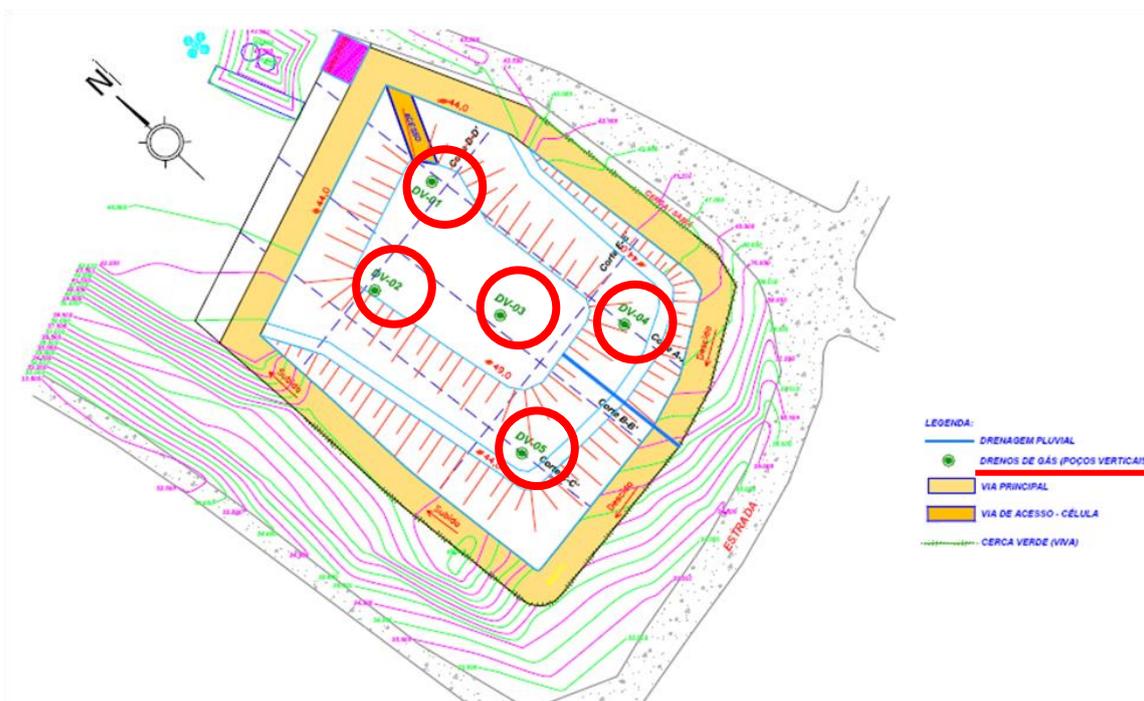
Equação III.3

Onde:

- Q é a vazão do biogás, em m³/h;
- v é velocidade do gás, em m/s
- A é a área da seção por onde está passando o gás, no caso, seção do tubo de PVC.

A medição da velocidade do biogás nos cinco drenos da célula experimental (marcados em vermelho na Figura III.8) foi realizada por meio da inserção de um termo-anemômetro transversalmente ao sentido do escoamento do fluxo de gás na tubulação. O equipamento utilizado foi o termo-anemômetro digital portátil, marca Instrutherm, modelo TAFR-180, sistema de fio quente, faixa de medição de 0,2 a 20 m/s, limite de quantificação de 0,1 m/s e faixa de erro de $\pm 5\%$ da leitura.

Figura III.8: Layout final da célula experimental da Muribeca (MACIEL, 2009).



O procedimento consiste em: (a) acoplar um tubo de PVC na saída do dreno de biogás. Este tubo possui 0,037 m de diâmetro e é perfurado para colocação da haste do anemômetro; (b) Colocar o termo-anemômetro no orifício e esperar a leitura estabilizar, então finalmente realizar a leitura da velocidade, conforme apresentado na Figura III.9. Observando sempre a influência dos ventos na leitura.

Figura III.9: Monitoramento da vazão do biogás dos drenos



Além da vazão, mediu-se a pressão e a concentração dos principais gases que compõem o biogás nos drenos. Essa medição podia ser realizada através da colocação de um CAP furado, com um bico rosqueado no orifício e vedado com silicone. Uma mangueira de PVC com uma das pontas acoplada ao bico e a outra acoplada nos equipamentos de medição de pressão de biogás e quantificação dos principais componentes do biogás (CH_4 , CO_2 , O_2 e H_2S). Na Tabela III.2 estão descritos os equipamentos utilizados e suas características.

A periodicidade das medições dos parâmetros descritos acima foi semanal.

Também, vale salientar, que os dados de precipitação apresentados neste trabalho são oriundos de um pluviômetro localizado no Aterro da Muribeca, implantado com o objetivo de quantificar as precipitações dessa microrregião.

3.3.2 Emissões fugitivas pela camada de cobertura

As determinações dos fluxos dos gases CH_4 e CO_2 em cada tipo de cobertura da célula experimental foram realizadas utilizando-se a metodologia do ensaio com placa de fluxo estática descrita por MACIEL (2003). Essa metodologia consiste na cravação cuidadosa da câmara no solo da cobertura e na posterior quantificação da concentração dos gases no interior da câmara, com medição da temperatura interna e externa, pressão interna e externa, ao longo do tempo.

A placa de fluxo utilizada nos ensaios é a mesma descrita por MACIEL (2003) com modificações realizadas pelo próprio autor mais recentemente (2009). A câmara foi construída

com lateral de aço galvanizado de 2 mm de espessura, sendo o topo da câmara em acrílico cristal com 8mm de espessura, fixado na parte metálica com dois parafusos em cada lateral e vedado com espuma de poliuretano de alta densidade. No topo da caixa existem três conexões de saída (tipo encaixe rápido) onde, por meio de uma mangueira flexível de polietileno, são conectados os equipamentos de medição de gases e pressão. A câmara também possui entradas para adaptação de equipamento para medição da temperatura interna do gás. A placa de fluxo e os equipamentos utilizados no ensaio são mostrados na Figura III.10 e suas características podem ser visualizadas na Tabela III.2.

Figura III.10: Equipamentos utilizados nos ensaios de placa de fluxo



Tabela III.2: Equipamentos utilizados nas medições de pressão e concentração nos dos drenos de biogás e nos ensaios de placa e suas respectivas características

Parâmetro	Equipamento	Faixa de medição	Limite de quantificação	Faixa de erro
CH ₄	Analisador de gases Dräger, Modelo X-am 7000	0 a 100%	0,1%	± 5,0 %
CO ₂		0 a 100%	0,1%	± 2,0 %
O ₂		0 a 25%	0,1%	± 5,0 %
H ₂ S		0 a 500 ppm	1 ppm	± 1,0 ppm
Pressão do biogás	Manômetro digital portátil Dwyer, Modelo 477-2	0 a 10 kPa	3,0 Pa	±0.5%
Pressão atmosférica	Barômetro digital portátil Lufft, Modelo C300	750 a 1100 hPa	0,1 hPa	±0,5 hPa
Temperatura do biogás T _{interna} T _{externa}	Termômetro digital Minipa, Modelo MT-525	-100°C a 1300°C	0,1°C	± 0,7°C

Para o desenvolvimento do ensaio, a câmara é cravada em local previamente determinado, precedido de um nivelamento e limpeza do terreno. Em seguida os equipamentos são acoplados e as medições dos parâmetros são feitas em intervalos de tempo pré-estabelecidos durante um período mínimo de 30 a 60 minutos. A instalação da placa de fluxo segue o seguinte procedimento:

- A câmara é colocada no local do ensaio e pressionada contra o solo para fixação de forma que a cravação seja vertical, com os conectores de saída abertos de maneira que não ocorra acúmulo de gases no interior da câmara;
- Após a fixação é colocado solo para vedação lateral;
- A leitura da concentração dos gases na placa de fluxo estática inicia-se logo após a sua cravação e este momento é considerado o instante inicial de cada ensaio.

A determinação do fluxo de gás na camada foi realizada por meio da avaliação da massa (ou volume) de CH₄ aprisionada no interior da câmara com o tempo, ou seja, a emissão de CH₄ está relacionada com a velocidade de aumento da concentração do gás no interior da câmara. Vale ressaltar que os volumes foram normalizados para as Condições Normais de Temperatura e Pressão (CNTP). A equação III.4 representa a forma de determinação do fluxo volumétrico nos ensaios e placa de fluxo estática.

$$J = \frac{V_p}{A} \cdot \frac{\Delta C}{\Delta t}$$

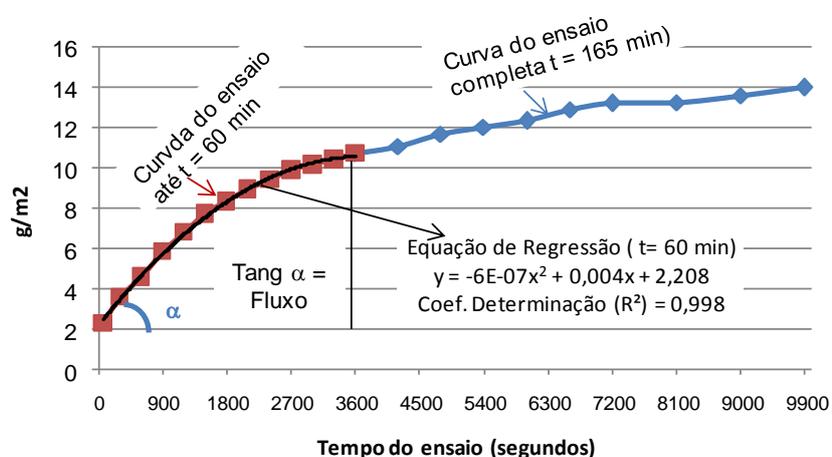
Equação III.4

Onde:

- J = fluxo volumétrico (NI/m²/dia)
- V_p = Volume útil da placa de fluxo (l)
- A = área de solo coberto pela câmara (m²)
- ΔC/Δt = Variação da concentração do gás (% vol.) com o tempo (s)

Para determinação dos fluxos em termos mássicos, utiliza-se a densidade corrigida dos gases em função das leituras de temperatura interna. O fluxo mássico foi calculado no intervalo inicial do ensaio para se obter a maior taxa de percolação do gás pela camada de cobertura, simulando a condição do aterro de resíduos, onde a camada de cobertura fica em contato com a atmosfera e consequentemente ocorrem os gradientes máximos de pressão e concentração (MACIEL, 2003). As taxas de fluxo mássico e coeficiente linear de determinação (R^2) foram determinados em todos os testes, sendo os ensaios considerados válidos aqueles com valores de coeficientes acima de 0,9. A Figura III.11 apresenta a forma de determinação do fluxo de metano e gás carbônico.

Figura III.11: Determinação do fluxo de gases a partir de ensaios de placa de fluxo (MARIANO, 2008).



Após cada ensaio de placa de fluxo foi também coletada uma amostra de solo em anel metálico para determinação da umidade e peso específico aparente de campo da camada superficial (Figura III.12), de acordo com as seguintes metodologias ABNT NBR 6.457/1986 e 9.813/87 , respectivamente.

Figura III.12: Coleta de amostra pra determinação de umidade e peso específico



Para esta dissertação foram realizados mais 45 ensaios no período de setembro de 2010 a abril de 2012, divididos da seguinte forma: 27 ensaios de placa de fluxo no período de setembro de 2010 a janeiro de 2011, compreendendo um período de baixas precipitações, e posteriormente, mais 18 ensaios no período de abril a junho 2012, abrangendo o período chuvoso. A quantidade de ensaios está de acordo com o que determina a Agência Ambiental do Reino Unido (*ENVIRONMENTAL AGENCY*, 2004), conforme descrito na Revisão bibliográfica desta Dissertação.

Também serão analisados os ensaios realizados por MACIEL (2009) e LOPES (2011) no período Setembro de 2008 a fevereiro 2010, totalizando 107 ensaios de placa de fluxo.

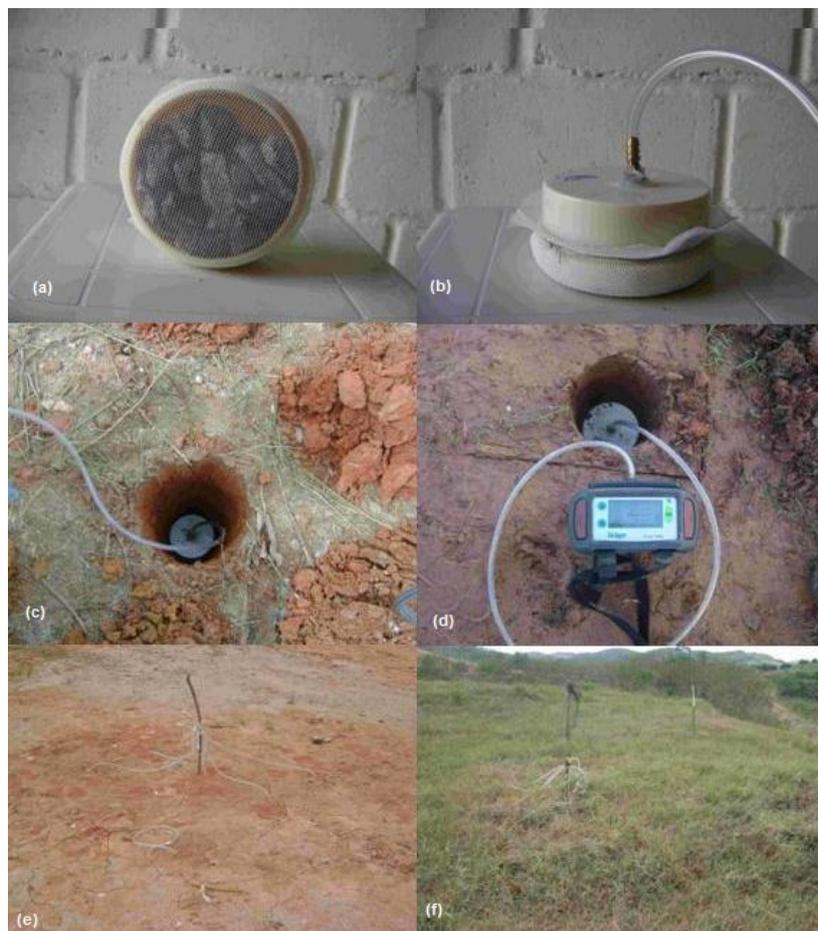
Os resultados dos ensaios de fluxo foram somados as características do solo no momento do ensaio, a pressão atmosférica, o gradiente de pressão entre a massa de resíduo e atmosfera e as concentrações dos gases que compõe o biogás (CH_4 , CO_2 e O_2) na interface cobertura/resíduo, com o objetivo de avaliar as variáveis inerentes ao solo, ao ambiente externo e ao biogás. Os dois últimos parâmetros foram medidos diretamente no dispositivo tipo DMPC. É importante salientar que o dispositivo DMPC medido, possuía uma distância máxima de 2 metros do local do ensaio de placa de fluxo.

3.3 Dispositivos de medição de pressão e concentração (DMPC)

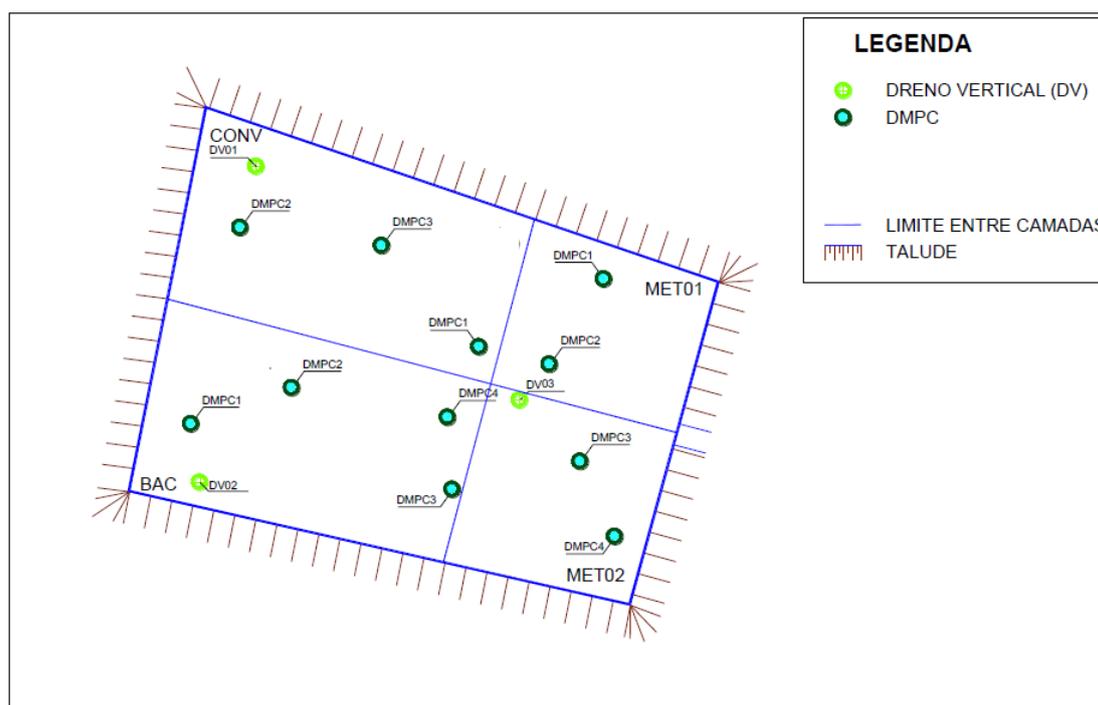
Nos estudos de LOPES (2011), a autora instalou os Dispositivos de Medição de Pressão e Concentração (DMPC) em cada camada de cobertura da célula experimental, objetivando aferir a pressão e concentração do biogás na base da camada de cobertura (interface solo/resíduo).

Esses dispositivos foram confeccionados utilizando a conexão de PVC do tipo CAP, com diâmetro nominal de 100 mm. Os CAP's foram perfurados, e no orifício foi rosqueado um bico em latão, em seguida aplicou-se silicone, para que não houvesse escape do biogás. No bico foi conectada uma mangueira de PVC com diâmetro interno de 5,0 mm e comprimento variável, dependendo da espessura da camada de cobertura no local, visto que o mesmo deverá chegar até a superfície da camada de cobertura. Para evitar obstrução com solo, o CAP foi preenchido com brita nº3 e colocado uma tela de arame galvanizado com abertura de 1,0 mm para proteção (Figura III.13), como desenvolvido por MACIEL (2003).

Figura III.13: DMPC (a) colocação de brita e tela na base do CAP (b) conexão de bico de latão e mangueira (c) colocação do conjunto de CAP e mangueira no solo (d) medição de concentração (e) e (f) DMPC instalados nas camadas de cobertura (LOPES, 2011).



Para esta pesquisa trocou-se as mangueiras de PVC por mangueiras automotivas, resistente a gasolina (líquido corrosivo), visto que, a primeira ressecou com as intempéries e passagem do biogás. Além das mangueiras, a tela de arame galvanizado também sofreu com o poder corrosivo do biogás, a mesma foi trocada por telas de plástico com diâmetro similar. Os locais onde os DMPC's foram instalados inicialmente permaneceram os mesmos, como mostra a Figura III.14.

Figura III.14: Localização dos DMPC's (LOPES, 2011).

Os equipamentos utilizados para a medição da pressão e concentração do biogás nos DMPC's foram os mesmos utilizados nas medições dos drenos verticais (Tabela III.2).

As leituras de pressão e concentração de biogás em cada um dos DMPC na interface do cobertura/resíduo foram realizadas após a realização do ensaio de placa de fluxo. Inicialmente era feita a leitura da pressão, e posteriormente se conectava o detector de gás e esperava-se 3 minutos, no mínimo, para estabilização e assim proceder a leitura das concentrações do biogás.

3.4 Relação entre as emissões entre pelos drenos e pela camada de cobertura

De posse dos dados de emissões fugitivas e emissões pelo sistema de drenagem estabeleceu-se uma relação entre o fluxo médio mensal de metano e dióxido de carbono nas diferentes camadas e a emissão total (média mensal) dos mesmos gases, da célula experimental, ao longo do tempo. Considerou-se a emissão total, a soma das emissões pelo sistema de drenagem e pela camada de cobertura.

O passo-a-passo para determinação da relação emissão pela camada de cobertura/emissão total (E_{cc}/E_t) está apresentado abaixo:

- determina a média mensal das emissões de cada dreno do sistema de drenagem em m^3/dia ;
- determina a média mensal das emissões por cada tipo de camada de cobertura em $g.m^2/dia$;
- transforma as emissões por cada tipo de camada de cobertura para m^3/dia , multiplicando as emissões mensais pela área total de cada camada de cobertura e posteriormente dividindo pela densidade do gás ($CH_4= 716 g/m^3$ e $CO_2= 1850 g/m^3$);
- obtem a emissão total, somando a média mensal das emissões por cada dreno e pela camada de cobertura no qual o dreno está localizado. Vale salientar que os drenos 1, 2 e 3, estão localizados, respectivamente, nas camadas convencional, barreira capilar e metanotrófica.
- dividi a emissão por cada camada de cobertura pela emissão total encontrada no passo anterior.

CAPITULO IV- RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Caracterização das camadas de cobertura

4.1.1 Características geotécnicas

Os estudos utilizados procuram mostrar a evolução das características geotécnicas dos materiais das distintas camadas de cobertura da célula experimental ao longo do tempo. Desta forma a Tabela IV.1 apresenta os resultados obtidos por LOPES (2011) e por essa pesquisa, respectivamente.

Na caracterização realizada por LOPES (2011), as amostras da camada convencional e barreira capilar foram classificadas como siltes de baixa plasticidade, de acordo com o Sistema Unificado de Classificação dos Solos (SUCS), e as camadas metanotrófica como siltes de média a alta plasticidade.

Para este estudo, todas as camadas foram classificadas como siltes de baixa plasticidade, também segundo ao SUCS.

Com isso, pode-se observar ambas as camadas metanotróficas tiveram sua classificação alterada de um silte de alta plasticidade, para um silte de baixa plasticidade. No entanto, não é possível afirmar que os solos destas camadas perderam quantidades significativas de partículas responsáveis pela alta plasticidade do solo, visto que os parâmetros utilizados pelo SUCS apresentaram valores limítrofes entre as duas classificações – a encontrada por LOPES (2011) e desse estudo.

Com relação a permeabilidade ao ar e a água da camada convencional, pode-se observar que para ambas as permeabilidades aumentaram com o passar do tempo, sugerindo. Tornando o solo mais poroso e permeável a passagem da água das chuvas e emissões fugitivas de biogás pela camada de cobertura.

Tabela IV.1: Caracterização do solo das camadas de cobertura da célula experimental em 2011 (LOPES, 2011) e em 2012

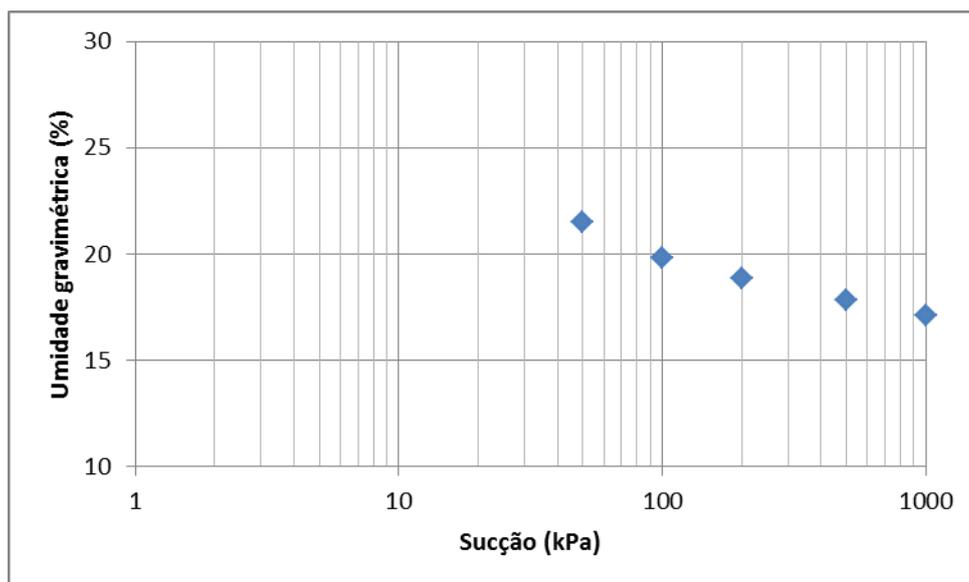
Análises		Camada Convencional		Barreira Capilar		Camada Metanotrófica 1		Camada Metanotrófica 2	
		LOPES (2011)	Neste estudo	LOPES (2011)	Neste estudo	LOPES (2011)	Neste estudo	LOPES (2011)	Neste estudo
Granulometria	Argila (%)	29	28	25	32	23	25	27	23
	Silte (%)	23	27	24	24	29	33	25	28
	Areia fina (%)	8	10	15	10	10	6	15	16
	Areia média (%)	20	18	19	17	15	17	12	16
	Areia grossa (%)	19	15	15	15	16	15	16	13
	Pedregulho (%)	1	2	2	2	7	3	5	3
Limites de consistência	LL (%)	42	47	43	47	52	46	50	49
	LP (%)	29	33	31	33	39	35	33	36
	IP (%)	13	14	13	14	12	11	17	13
Massa específica seca – ρ_s (g/cm ³)		1,61	1,65	1,66	1,65	1,3	1,51	1,46	1,54
Umidade ótima (%)		19,9	19,13	19	19,13	22,9	21,51	18,4	20,82
Massa específica dos grãos – ρ_g (g/cm ³)		2,62	2,66	2,63	2,65	2,45	2,62	2,53	2,59
Permeabilidade saturada (m/s)		$1,5 \times 10^{-9}$	$1,3 \times 10^{-7}$	$4,4 \times 10^{-8}$	N.D.	$2,8 \times 10^{-6}$	N.D.	$9,2 \times 10^{-8}$	N.D.
Permeabilidade ao ar (m/s)		$4,0 \times 10^{-8}$	$3,6 \times 10^{-4}$	$2,2 \times 10^{-7}$	N.D.	$2,3 \times 10^{-5}$	N.D.	$3,2 \times 10^{-7}$	N.D.
Classificação do sistema unificado		ML		ML		MH	ML	MH	ML

4.1.2 Curva característica do solo

A curva característica ou curva de retenção de água no solo foi determinada por meio do ensaio de membrana de pressão, descrito no capítulo Materiais e Métodos desta dissertação.

A curva característica da camada convencional (Figura IV 1) foi obtida através de amostras coletadas em *in loco*, de forma a preservar a estrutura natural do solo da camada de cobertura.

Figura IV.1: Curva característica da camada convencional – Umidade gravimétrica versus sucção



A curva característica apresenta um formato de curva de retenção de solos finos.

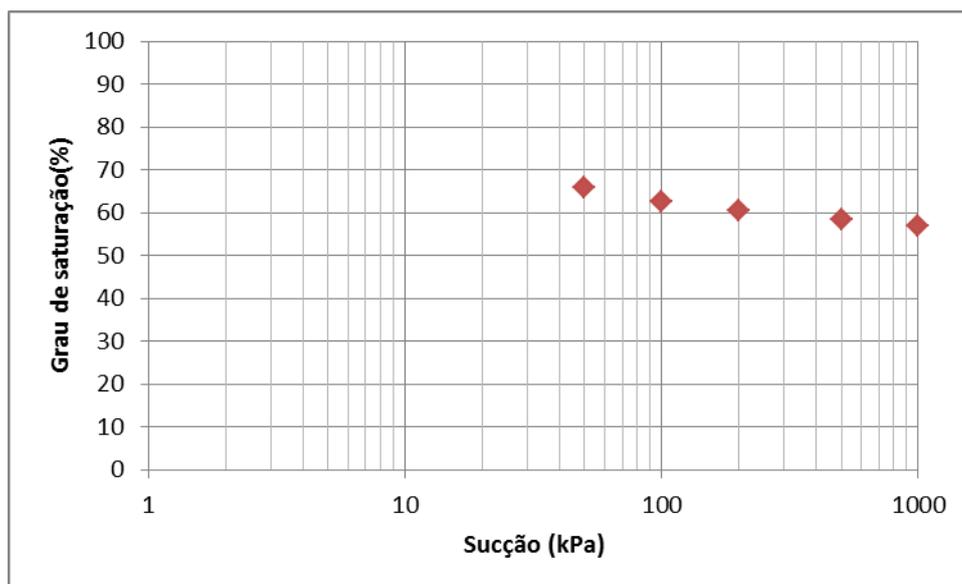
Através da curva umidade gravimétrica *versus* sucção, pode-se obter a relação entre a variação de umidade e sucção ($C = \Delta w / \log \Delta S$) que foi cerca de 1,48%, até a sucção 1000 kPa, que apresentou uma linearidade. Também nesta curva, verificou-se uma variação de 4,4% da umidade gravimétrica.

Para o mesmo tipo de solo LOPES (2011) encontrou um valor de C igual a 1,7% e a variação da umidade gravimétrica foi de 5%.

Segundo JUCÁ (1993), o valor de C é equivalente à capacidade de retenção de umidade e depende dos fatores: propriedades físicas do solo, variações de umidade e efeitos de histerese nas amostras ensaiadas. Como a ordem de grandeza dos valores encontrados por LOPES (2011), não foram muitos diferentes do encontrado nesse estudo, não pode-se afirmar que a camada convencional perdeu sua capacidade de retenção de água no solo.

A Figura IV.2 mostra a relação entre a saturação e a sucção matricial da camada convencional, de modo a avaliar o comportamento da solo da camada em diferentes saturações.

Figura IV.2: Curva característica da camada convencional – Grau de saturação versus sucção

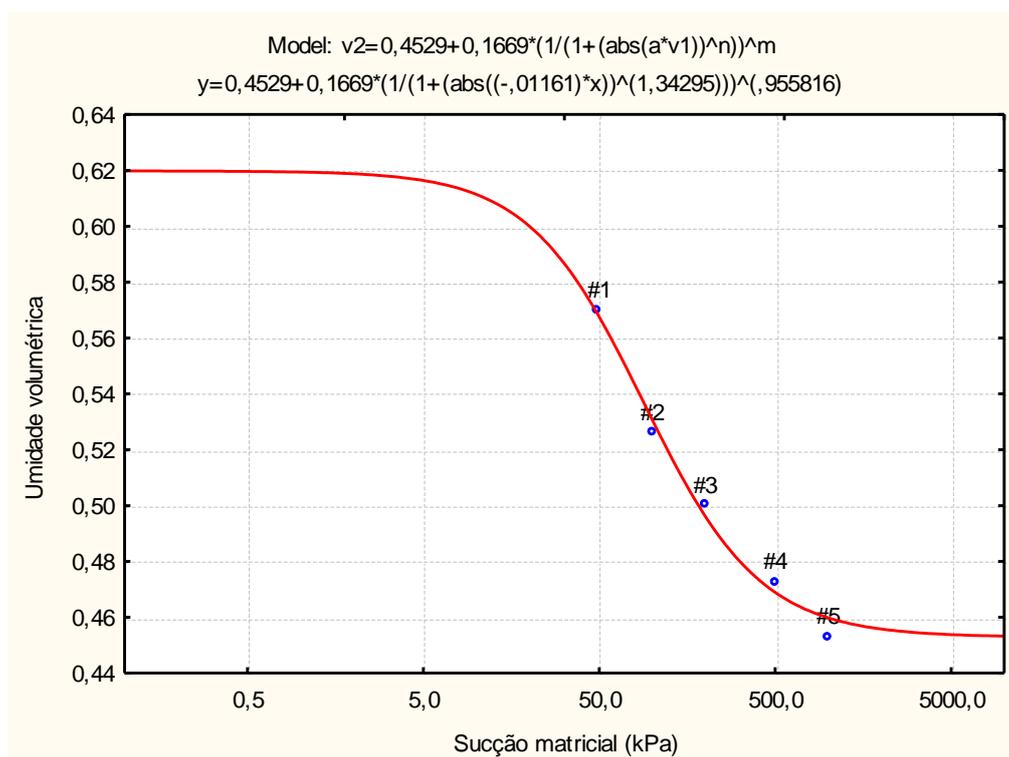


Também pode-se observar na Figura IV.2, uma linearidade entre os pontos ensaiados, impossibilitando a estimativa do ponto de mudança acentuada na curva de dessaturação do solo, denominado ponto de entrada generalizada de ar – GAE e conseqüentemente, sua respectiva sucção de entrada de ar.

Para esta mesma camada de cobertura, LOPES (2011), estimou uma sucção de entrada de ar de aproximadamente de 1.800 kPa com o grau de saturação de 87%.

MACIEL (2003) também determinou o GAE através da curva de retenção de água, para uma argila de alta plasticidade usada na cobertura da célula 8 do aterro controlado da Muribeca, onde encontrou-se valores de 87, 84% respectivamente para amostras moldadas na umidade ótima e com desvio de 6,1% acima e abaixo da umidade ótima.

Com a finalidade de se obter os parâmetros do material utilizado na camada, a curva de retenção da camada convencional foi ajustada utilizando-se do modelo de Van Genuchten (1980), mostrado na Figura IV.3.

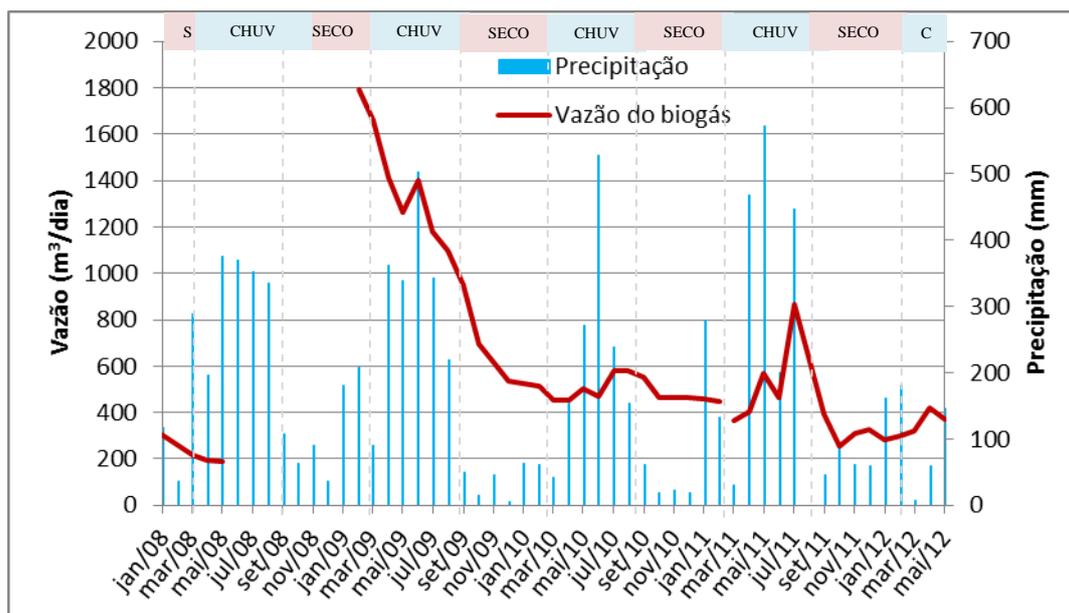
Figura IV.3: Curva de retenção de água ajustada pelo Modelo de van Genuchten (1980)

Para a realização do ajuste utilizou-se o programa *Statistica*, adotando-se um número de interações máximo de 100, com critério de convergência de 10^{-6} . Com isso, obteve-se um coeficiente de correlação (R^2) de 0,99.

4.2 Emissões de biogás pelo sistema de drenagem

No período de Janeiro de 2008 a Maio de 2012 realizou-se o monitoramento do sistema de drenagem da célula experimental da Muribeca, totalizando 53 meses de monitoramento. O monitoramento teve início após o enchimento e a geometrização da Célula (que durou 8 meses). Os parâmetros medidos foram: vazão, pressão e concentração do biogás emitido pelos drenos cinco drenos verticais do sistema de drenagem.

A Figura IV.4 apresenta a vazão do biogás emitido pelo sistema de drenagem ao longo de 4 anos de monitoramento.

Figura IV.4: Vazão de biogás emitido pelo sistema de drenagem vertical da célula experimental

Nos cinco primeiros meses de monitoramento, de Janeiro a Maio de 2008, a vazão de biogás pelo sistema de drenagem variou de 188, 87 a 304, 74 m³/dia. No entanto, vale salientar que durante esse período a Célula encontrava-se sem camada de cobertura (implantada em Fevereiro de 2008), por esse motivo, as emissões do biogás aconteciam em toda superfície da massa de resíduos e não majoritariamente pelo sistema de drenagem.

No período de Junho de 2008 a Janeiro de 2009 não foram realizadas as medições da vazão de biogás nos drenos verticais, visto que a sistemática de medição instalada não foi satisfatória (MACIEL, 2009). Nota-se que mesmo com a implantação da camada de cobertura as vazões medidas encontravam-se muito baixas, então o sistema de medição foi modificado e melhorado.

Em Fevereiro de 2009, retomou-se a leitura da vazão nos drenos e obteve-se os seguintes dados:

- No período de Fevereiro a Dezembro de 2009, a vazão variou entre 1790,52 e 536,46 m³/dia com média anual de 1145,69 m³/dia.
- No ano de 2010, a variação foi de 580,96 e 451,17 m³/dia com média anual de 501,83 m³/dia.
- Para o ano de 2011, a variação foi de 865,26 253,81 m³/dia com média anual de 440,75 m³/dia.
- E por fim, do período de Janeiro a Maio de 2012, a vazão variou de 418,62 a 283,07 m³/dia com média do período de 338,85 m³/dia.

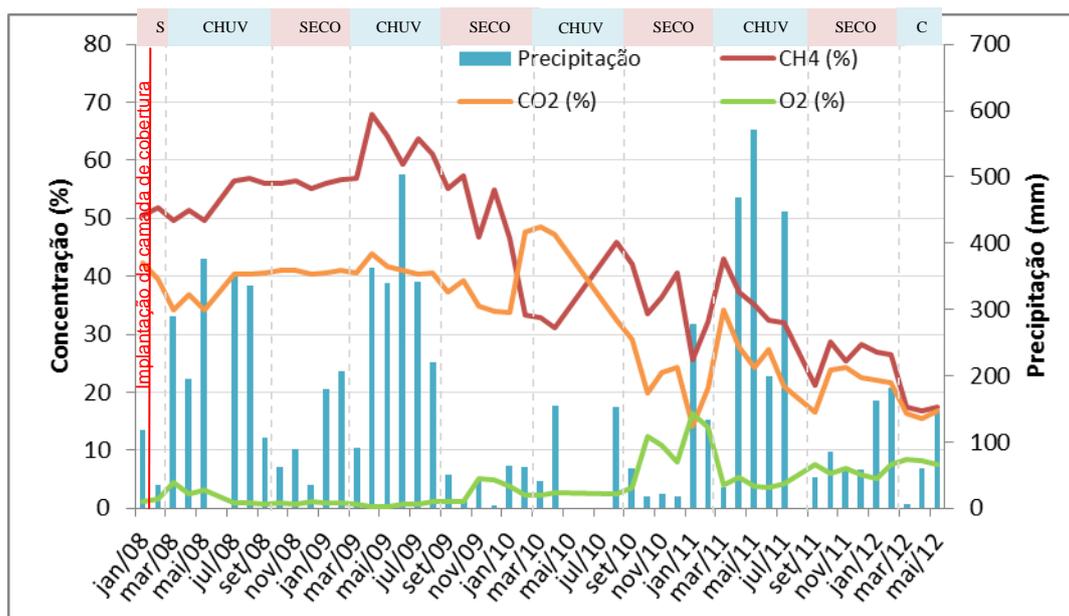
Com isso, pode-se observar que a vazão de biogás foi significativamente reduzida ao longo do tempo. Considerando as médias anuais, a redução da vazão do ano de 2009 para o ano de 2012 foi aproximadamente 70%. Tal decréscimo nas emissões pelo sistema de drenagem pode ter acontecido devido a redução da matéria carbonácea presente nos resíduos aterrados.

Outra questão muito importante são os incrementos de vazão no sistema de drenagem nos períodos chuvosos. Pode-se observar que a partir de Fevereiro de 2009, a curva de vazão de biogás começou a decrescer, no entanto, em meses de intensa precipitação, a produção de gás sofreu uma nítida elevação. Tal fato ocorreu em todos os anos estudados: em Junho de 2009, em Maio e de Julho a Setembro de 2010, em Maio e Julho de 2011 e em Abril de 2012.

A partir de 2010, todos os anos os picos de vazão ocorreram nos períodos chuvosos, com exceção do primeiro ano de monitoramento ou segundo ano de encerramento da Célula que pico de vazão ocorreu no mês de Fevereiro, devido, provavelmente, a maior quantidade de resíduos a ser decomposto.

Esses picos de vazão nos drenos podem acontecer por dois motivos: (i) o excedente de água que entra na massa de resíduos culmina numa maior atividade microbológica que resulta incremento da produção de biogás; e (ii) as camadas de cobertura encontram-se bastante úmidas, muitas vezes saturadas, impossibilitando, desta forma, a passagem de biogás através da emissões fugitivas, então o fluxo preferencial do biogás é o sistema de drenagem.

Na Figura IV.5 pode-se observar a composição do biogás ao longo de 4 anos de monitoramento.

Figura IV.5: Concentração do biogás emitido pelo sistema de drenagem vertical da célula experimental

Onde têm-se:

- No primeiro ano de monitoramento, de Janeiro a Dezembro de 2008, a composição média do biogás foi: 53,6% de CH₄, 39,2% de CO₂ e 1,7% de O₂.
- No segundo ano de monitoramento, de Janeiro a Dezembro de 2009, a composição média do biogás foi: 58,4% de CH₄, 39,6% de CO₂ e 1,5% de O₂.
- No terceiro ano de monitoramento, de Janeiro a Dezembro de 2010, a composição média do biogás foi: 38,1% de CH₄, 34,0% de CO₂ e 5,3% de O₂.
- No quarto ano de monitoramento, de Janeiro a Dezembro de 2011, a composição média do biogás foi: 31,0% de CH₄, 23,4% de CO₂ e 7,1% de O₂.
- E no período de Janeiro a Maio de 2012, a composição média do biogás foi: 21,0% de CH₄, 18,5% de CO₂ e 7,4% de O₂.

Nota-se, no período estudado, um aumento das concentrações de CH₄ e CO₂ do ano 2008 para 2009, e em seguida, a concentração de ambos os gases começa a decrescer, com a queda da concentração do CH₄ e CO₂, a concentração O₂ aumenta.

Considerando as médias mensais de cada componente do biogás, tem-se a variação de concentração intervalo de tempo de 53 meses, apresentado na Tabela IV.2.

Tabela IV.2: Variação da concentração dos componentes do biogás neste estudo e comparação com a literatura

COMPONENTES	VARIAÇÃO DA CONCENTRAÇÃO (%)	
	Medidas neste estudo	Segundo NIKIEMA et. al. (2007)
Metano (CH ₄)	16,8 – 68,0	30 – 70
Dióxido de carbono (CO ₂)	14,1 – 48,6	20 – 50
Oxigênio (O ₂)	0,3 - 16,4	0,1 – 1,0
Ácido sulfídrico (H ₂ S)	0,0 - 0,04	0 – 0,2

Observa-se que a composição do biogás medido é bastante similar ao encontrado na por NIKIEMA *et. al.* (2007), apresentado na Revisão Bibliográfica. No entanto nota-se, que o menor valor encontrado dos componentes CH₄, CO₂ e H₂S ficaram um pouco abaixo do que se tem na literatura, por este motivo a concentração, a maior concentração de O₂ medida, também ultrapassou o valor máximo do referido autor.

BRITO FILHO (2005), relata para ensaios realizados nos gases provenientes do aterro sanitário de Nova Iguaçu, localizado na região metropolitana do Rio de Janeiro, valores de metano variando entre 44 e 76% e valores de dióxido de carbono variando entre 8 e 15%. No aterro controlado “Terra Brava”, também localizado na região metropolitana do Rio de Janeiro, o autor relata quantidades de metano variando entre 40 e 76%, para valores de dióxido de carbono variando entre 7 e 15%. Com relação os valores encontrados por BRITO FILHO (2005), nos Aterros Sanitário de Nova Iguaçu e Controlado “Terra Brava”, os valores máximos e mínimos de CH₄ e CO₂ foram menores.

Também pode-se observar na Figura IV.5, que nos períodos secos, quando a camada de cobertura está menos úmida e porosa ao ar, a concentração de oxigênio no biogás aumenta, devido, provavelmente a entrada do mesmo na massa de resíduos via camada de cobertura. Com o aumento da concentração de oxigênio, acontece uma queda de na concentração de outros componentes do biogás, isso acontece porque o oxigênio oxida o metano, tendo como produto dióxido de carbono e água. Nota-se tal fato nos seguintes meses:

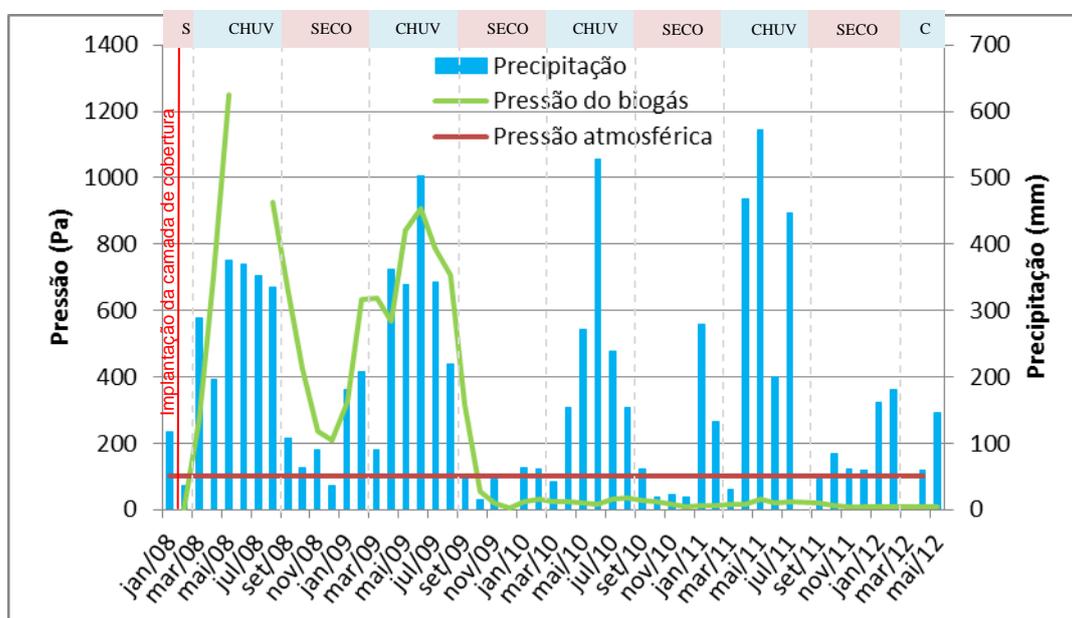
- Meses de Novembro de 2009 a Janeiro de 2010;
- Meses de Setembro de 2010 a Fevereiro de 2011;
- Meses de Setembro a Novembro de 2011;
- Mês de Fevereiro de 2012.

Por outro lado, segundo JUNQUEIRA (2000), nos períodos chuvosos, acontece uma entrada de uma carga extra de oxigênio dissolvido na água. Esse comportamento pode ser observado nos meses abaixo:

- Meses de Março e Maio de 2009;
- Meses de Março e Abril de 2012.

Com relação a pressão do biogás emitido pelo sistema de drenagem (Figura IV.6) ao longo de 4 anos de monitoramento.

Figura IV.6: Pressão de biogás pelo sistema de drenagem vertical da célula experimental



Pode-se observar que:

- No primeiro ano de monitoramento, de Fevereiro a Dezembro de 2008, a pressão do biogás variou de 1248,3 a 2,3 Pa, com média anual de 520,3 Pa. O pico de pressão do período foi no mês 5 ou mês de Maio.
- No segundo ano de monitoramento, de Janeiro a Dezembro de 2009, a pressão do biogás variou de 907 a 5,83 Pa, com média anual de 483,8 Pa. Os pico de pressão do período foi nos meses de Fevereiro, Março, Maio e Junho (mês 14,15,17 e 18; respectivamente).

- No terceiro ano de monitoramento, de Janeiro a Dezembro de 2010, a pressão do biogás variou de 36,5 a 9 Pa, com média anual de 24 Pa. Período com valores de pressão muito uniformes, ocorrendo uma pequena elevação no mês 32 (Agosto).
- No quarto ano de monitoramento, de Janeiro a Dezembro de 2011, a pressão do biogás variou de 30,3 a 8,5 Pa, com média anual de 17,1 Pa. Período com valores de pressão muito uniformes, ocorrendo uma pequena elevação no mês 41 (Maio).
- E por fim, do período de Janeiro a Maio de 2012, a pressão do biogás variou de 10,3 a 7 Pa, com média anual de 8,6 Pa. Período com valores de pressão muito uniformes, sem picos de pressão.

Nota-se nitidamente que os picos de pressão ocorreram: (i) até 14 meses após o fechamento da Célula pela camada de cobertura; e (ii) durante os períodos chuvosos. Ambos os indícios estão relacionados a períodos de maiores produções de biogás, o primeiro, devido a maior quantidade de resíduo biodegradado (lixo novo) e o segundo, produto do incremento de umidade dos resíduos, provocado pelos meses chuvosos e pelo fluxo preferencial do biogás pelo sistema de drenagem.

Outra questão muito importante é a influência do gradiente de pressão entre o biogás e a atmosfera, visto que o fluxo de gás se desloca de região de maior pressão para região de menor pressão. Então, no início do monitoramento (até setembro de 2009), quando a pressão do biogás foi maior que a pressão atmosférica teve-se uma tendência de fuga de biogás para a atmosfera, em contraposição, quando a pressão do biogás estava inferior a pressão atmosférica (a partir de outubro de 2009), há possibilidade do ar atmosférico chegar ao interior Aterro.

Considerando as médias anuais, a redução da vazão do ano de 2009 para o ano de 2012 foi aproximadamente 98%, desta forma, pode-se observar que a pressão do biogás foi significativamente reduzida ao longo do tempo. Tal redução pode ter acontecido devido a decréscimo das emissões de biogás.

4.3 Emissões fugitivas de biogás pelas camadas de cobertura

Para uma melhor compreensão do estudo, dividimos a apresentação dos dados e análise dos resultados por camada. Assim, inicialmente iniciaremos com a camada convencional, depois com a barreira capilar e por último com a camada metanotrófica.

4.3.1 Camada convencional

Para a avaliação do comportamento da camada de cobertura convencional foram realizados 15 ensaios no período de setembro de 2010 a abril de 2012, apresentados na Tabela IV.3 com as principais variáveis que podem influenciar nas emissões.

As emissões fugitivas de CH₄ e CO₂ na camada convencional, medidas no período de estudo, variou de 1,72 a 122,97 g/m².dia e 0,00 a 248,33 g/m².dia, respectivamente.

O grau de compactação variou de 86,19 a 131,18% com média 104,60%, caracterizando um solo bem compactado. E o grau de saturação esteve, na maioria dos ensaios, abaixo de 50%, com uma variação de 31,29 a 101,25% e média de 52,30%.

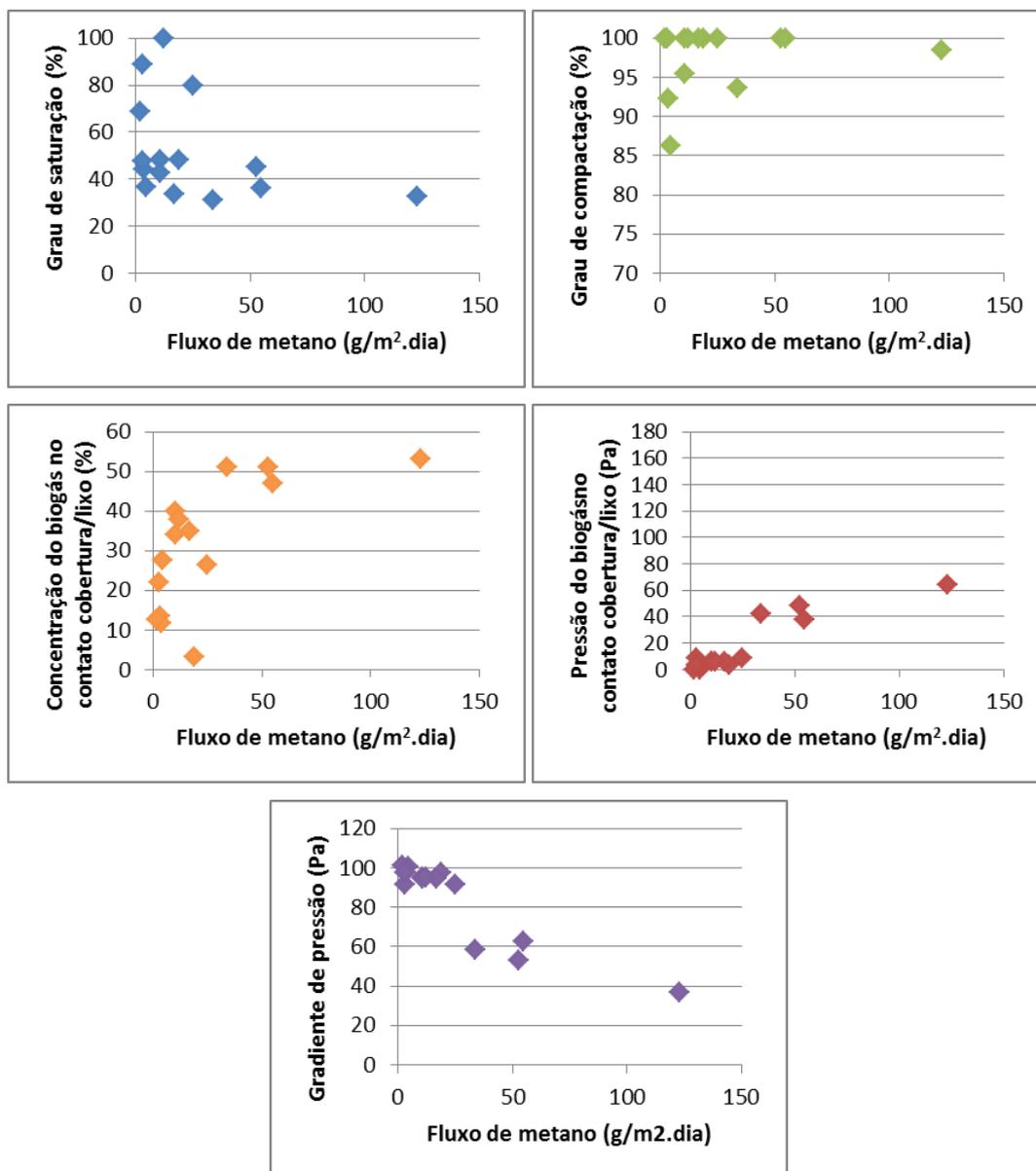
No período de Setembro de 2010 e Janeiro de 2011, que compreende o período seco, a média do grau de saturação foi de cerca de 49,30%, por outro lado, no período chuvoso, de Abril a Junho de 2012, a média foi de 56,78%. Existindo, desta forma, uma diferença média de aproximadamente 7%.

Tabela IV.3: Fluxos de biogás e parâmetros que influenciam na camada convencional

Nome do ensaio	Data do ensaio	Fluxo de CH ₄ (g/m ² .dia)	Fluxo de CO ₂ (g/m ² .dia)	Grau de compactação (%)	Grau de saturação (%)	Pressão no contato cobertura/ lixo (Pa)	Pressão atmosférica (Pa)	Gradiente de pressão (Pa)	CH ₄ no contato cobertura/ lixo (%)	CH ₄ na placa de fluxo (%)	CO ₂ no contato cobertura/ lixo (%)	CO ₂ na placa de fluxo (%)
C1	23/09/2010	52,68	172,03	100,00	45,05	48,0	100,89	52,89	51,0	4,0	39,0	6,2
C2	01/10/2010	122,97	248,33	98,38	32,80	64,0	100,42	36,42	53,0	17,5	38,0	16,0
C3	15/10/2010	10,40	114,99	100,00	48,37	6,0	100,83	94,83	40,0	1,3	26,0	5,2
C4	28/10/2010	18,90	110,86	100,00	47,93	3,0	100,22	97,22	3,2	3,3	17,5	7,0
C5	11/11/2010	33,84	130,58	93,59	31,29	42,0	100,51	58,51	51,0	4,3	31,0	6,0
C6	30/11/2010	16,59	96,97	100,00	33,84	6,0	100,35	94,35	35,0	1,9	18,0	3,2
C7	10/12/2010	54,77	142,80	100,00	35,87	38,0	100,32	62,32	47,0	7,0	34,4	6,6
C8	05/01/2011	25,03	138,45	100,00	79,72	9,0	100,51	91,51	26,5	2,3	20,5	4,6
C9	11/01/2011	2,92	36,49	100,00	88,94	9,0	100,52	91,52	13,4	0,3	12,5	1,8
C10	24/04/2012	4,42	0,00	86,19	36,44	0,0	100,65	100,65	27,5	0,3	16,0	0,0
C11	27/04/2012	3,51	0,00	92,22	43,93	3,0	100,64	97,64	11,6	0,2	21,0	0,0
C12	14/05/2012	10,40	114,99	95,49	42,81	6,0	100,65	94,65	34,0	1,2	32,0	1,6
C13	31/05/2012	11,96	0,00	100,00	100,00	6,0	100,98	94,98	38,0	0,4	31,0	0,0
C14	08/06/2012	1,72	0,00	100,00	68,52	0,0	100,89	100,89	12,6	0,2	8,6	2,1
C15	29/06/2012	2,76	0,00	100,00	47,74	3,0	100,76	97,76	22,0	0,4	16,0	5,2

A Figura IV.7 que apresenta a relação entre as emissões de CH₄ na camada convencional e os principais fatores que podem ter influenciado no fluxo do referido componente do biogás: grau de compactação e saturação, concentração de CH₄ e pressão no contato cobertura/lixo, e gradiente de pressão (pressão atmosférica-pressão do biogás).

Figura IV.7: Fatores que podem influenciar na emissão de CH₄ na camada convencional



Através desses gráficos de correlação foi possível confirmar a forte influência da pressão e concentrações de metano, no contato cobertura/lixo, e do gradiente de pressão na emissão de metano pela camada de cobertura convencional. Pressões acima de 40 Pa e concentrações de metano acima de 50%, no contato cobertura/lixo, e gradientes de pressão abaixo de 60% mostraram uma tendência a maiores emissões de metano. Os graus de saturação e compactação isoladamente não apresentaram correlação com as emissões de metano. Em relação ao grau de compactação, o mesmo pouco influenciou nas emissões de biogás, uma vez que toda a camada de cobertura apresentou um alto grau de compactação.

Neste sentido, pode-se inferir que apesar das condições geotécnicas favoráveis ao fluxo (baixa saturação do solo), o mesmo só irá ocorrer se existir um gradiente de pressão para o biogás atravessar a camada e concentração suficiente que não seja retida/transformada devido à retenção física do solo (que funciona como uma barreira física).

LOPES (2011) avaliou as emissões da mesma camada deste estudo, e concluiu que para pressões do biogás acima de 30 Pa e concentração de CH₄ acima de 40%, no contato cobertura/lixo, há uma tendência de maiores emissões de metano, por outro lado, o grau de compactação, na faixa de 85% a 105% não apresentou isoladamente correlação com as emissões de CH₄.

Nos ensaios realizados por MARIANO (2008), os valores de pressão acima de 100 Pa influenciaram nas emissões de gases pela camada de cobertura.

Observando um histórico maior de emissões (período de 2009 à 2012) LOPES (2011) também estudou a referida camada e encontrou uma variação de fluxo de CH₄ de 2,10 a 984,7 g/m².dia, excluindo os fluxos pontuais de maiores magnitudes (> 400 g/m².dia), há uma tendência de fluxo de CH₄ de até 250 g/m².dia.

As emissões fugitivas neste estudo foram menores do que o encontrado nos Aterros da Região Metropolitana do Recife para camadas convencionais: a faixa determinada por MACIEL (2003) para períodos chuvosos que variou de 102 a 363 g/m².dia e MARIANO (2008) que determinou emissões de CH₄ de até 401 g/m².dia.

4.3.2 Barreira capilar

Para a avaliação do comportamento da barreira capilar foram realizados 15 ensaios no período de setembro de 2010 a abril de 2012, visualizados na Tabela IV.4 com as principais variáveis que podem influenciar nas emissões.

Tabela IV.4: Fluxos de biogás e parâmetros que influenciam na barreira capilar

Nome do ensaio	Data do ensaio	Fluxo de CH ₄ (g/m ² .dia)	Fluxo de CO ₂ (g/m ² .dia)	Grau de compactação (%)	Grau de saturação (%)	Pressão no contato cobertura/lixo (Pa)	Pressão atmosférica (Pa)	Gradiente de pressão (Pa)	CH ₄ no contato cobertura/lixo (%)	CH ₄ na placa de fluxo (%)	CO ₂ no contato cobertura/lixo (%)	CO ₂ na placa de fluxo (%)
B1	23/09/2010	0,00	0,00	100,00	46,34	3,0	100,89	97,89	2,5	0,0	7,4	0,0
B2	01/10/2010	0,00	55,17	100,00	49,47	74,0	100,62	26,62	16,0	0,0	28,0	1,4
B3	15/10/2010	0,00	0,00	89,87	21,38	9,0	100,71	91,71	0,0	0,0	1,0	0,0
B4	28/10/2010	0,00	24,04	99,20	43,80	16,0	100,14	84,14	0,2	0,0	8,2	0,6
B5	11/11/2010	0,00	79,82	86,59	39,30	29,0	100,54	71,54	10,6	0,0	24,5	2,0
B6	30/11/2010	0,00	72,84	100,00	29,15	25,0	100,43	75,43	9,40	0,0	1,3	0,6
B7	10/12/2010	2,24	29,86	100,00	21,71	38,0	100,35	62,35	1,8	0,2	15,0	0,6
B8	05/01/2011	2,89	143,63	94,55	59,41	59,0	100,52	41,52	2,2	0,2	12,4	3,6
B9	11/01/2011	0,00	40,88	100,00	67,49	32,0	100,52	68,52	0,4	0,0	12,0	1,0
B10	24/04/2012	0,00	14,18	98,80	46,79	3,0	100,66	97,66	0,0	0,0	6,0	0,6
B11	27/04/2012	3,49	0,00	100,00	67,19	6,0	100,63	94,63	2,0	0,2	0,0	0,0
B12	14/05/2012	2,20	0,00	97,31	51,03	0,0	100,68	100,68	5,0	0,1	11,0	0,0
B13	31/05/2012	2,22	18,41	100,00	81,01	6,0	101,00	95,00	2,6	0,2	18,0	0,6
B14	08/06/2012	2,12	0,00	98,18	58,25	0,0	100,75	100,75	6,6	0,2	15,2	0,0
B15	29/06/2012	0,00	33,75	100,00	49,54	6,0	100,82	94,82	1,2	0,0	19,2	0,7

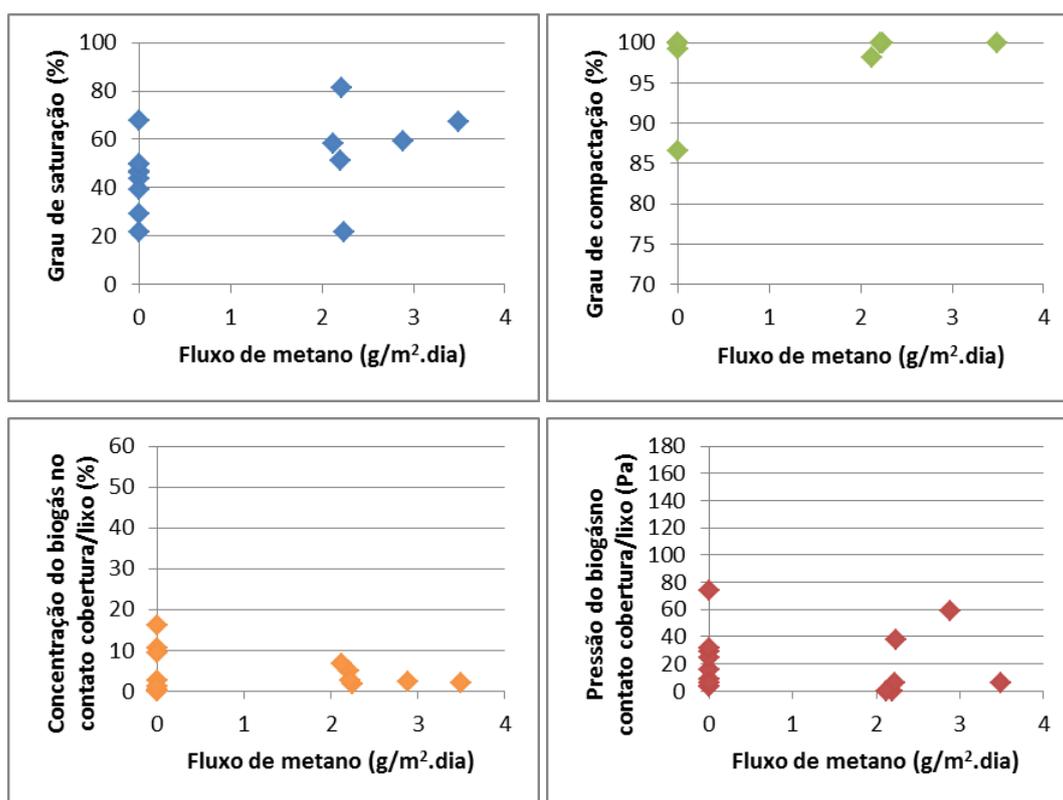
As emissões fugitivas de CH_4 e CO_2 na camada barreira capilar, que apresentou uma variação de 0,0 a 3,49 $\text{g/m}^2\cdot\text{dia}$ e 0,0 a 143,63 $\text{g/m}^2\cdot\text{dia}$, respectivamente.

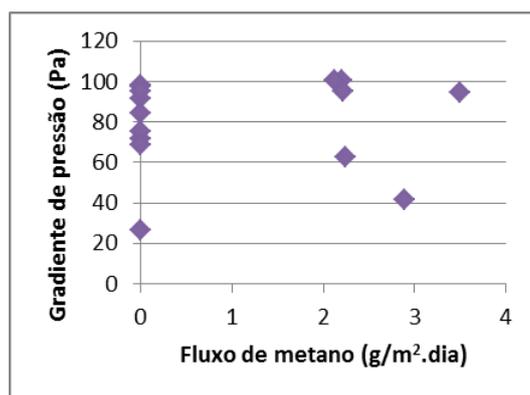
O grau de compactação encontrou-se, na maior parte dos ensaios, valores acima de 90% (exceto os ensaios B3 e B5), com uma variação de 86,59 a 121,03% e média de 98,93%. Com relação ao grau de saturação esteve, na maioria dos ensaios, abaixo de 60% (exceto nos ensaios B9, B11 e B13), com uma variação entre 21,38 a 81,01% e média de 48,80%.

No período seco, de Setembro de 2010 e Janeiro de 2011, a média do grau de saturação foi de cerca de 42%, em contraposição, no período chuvoso, de Abril a Junho de 2012, a média foi de 58,97%. Tendo, com isto, uma diferença média de cerca de 17%.

A Figura IV.8 mostra a relação entre as emissões de CH_4 na barreira capilar e os principais fatores que podem ter influenciado no fluxo do referido componente do biogás: grau de saturação e compactação, concentração de CH_4 e pressão no contato cobertura/resíduo, e gradiente de pressão (pressão atmosférica-pressão do biogás).

Figura IV.8: Fatores que podem influenciar na emissão de CH_4 na barreira capilar





Pode-se observar nos gráficos da Figura IV.9, que a concentração de metano no contato cobertura/lixo, os graus de saturação e compactação e o gradiente de pressão isoladamente não apresentaram correlação com as emissões de metano. Por outro lado, a pressão no contato cobertura/lixo teve uma nítida influência, para a barreira capilar. Pressões do biogás por volta de 40 Pa mostraram uma tendência a maiores emissões de metano.

Desta forma, para a barreira capilar, os parâmetros relativos ao solo da camada de cobertura e do biogás influenciam de uma forma conjunta nas emissões fugitivas..

LOPES (2011) avaliou as emissões da mesma camada deste estudo, e concluiu que para valores de grau de compactação acima de 70% o fluxo foi nulo. As demais variáveis não apresentaram individualmente correlação com as emissões de CH₄.

Nos estudos de LOPES (2011), em um período maior de tempo (de 2009 à 2012) e nesta mesma camada, a variação das emissões de CH₄ foi de 0 a 63,4 g/m².dia.

4.3.3 Camada metanotrófica

Para a avaliação do comportamento da camada metanotrófica foram realizados 15 ensaios no período de setembro de 2010 a abril de 2012, mostrados na Tabela IV.5 com as principais variáveis que podem influenciar nas emissões.

As emissões fugitivas de CH₄ e CO₂ na camada metanotrófica que apresentou uma variação de 0,0 a 6,75 g/m².dia e 0,0 a 86,85 g/m².dia, respectivamente.

O grau de saturação esteve, na maioria dos ensaios, acima de 40% (exceto nos ensaios M3, M6, M7 e M8), com uma variação entre 11,35 a 161,78% e média de 57,17%.

Tabela IV.5: Fluxos de biogás e parâmetros que influenciam na camada metanotrófica

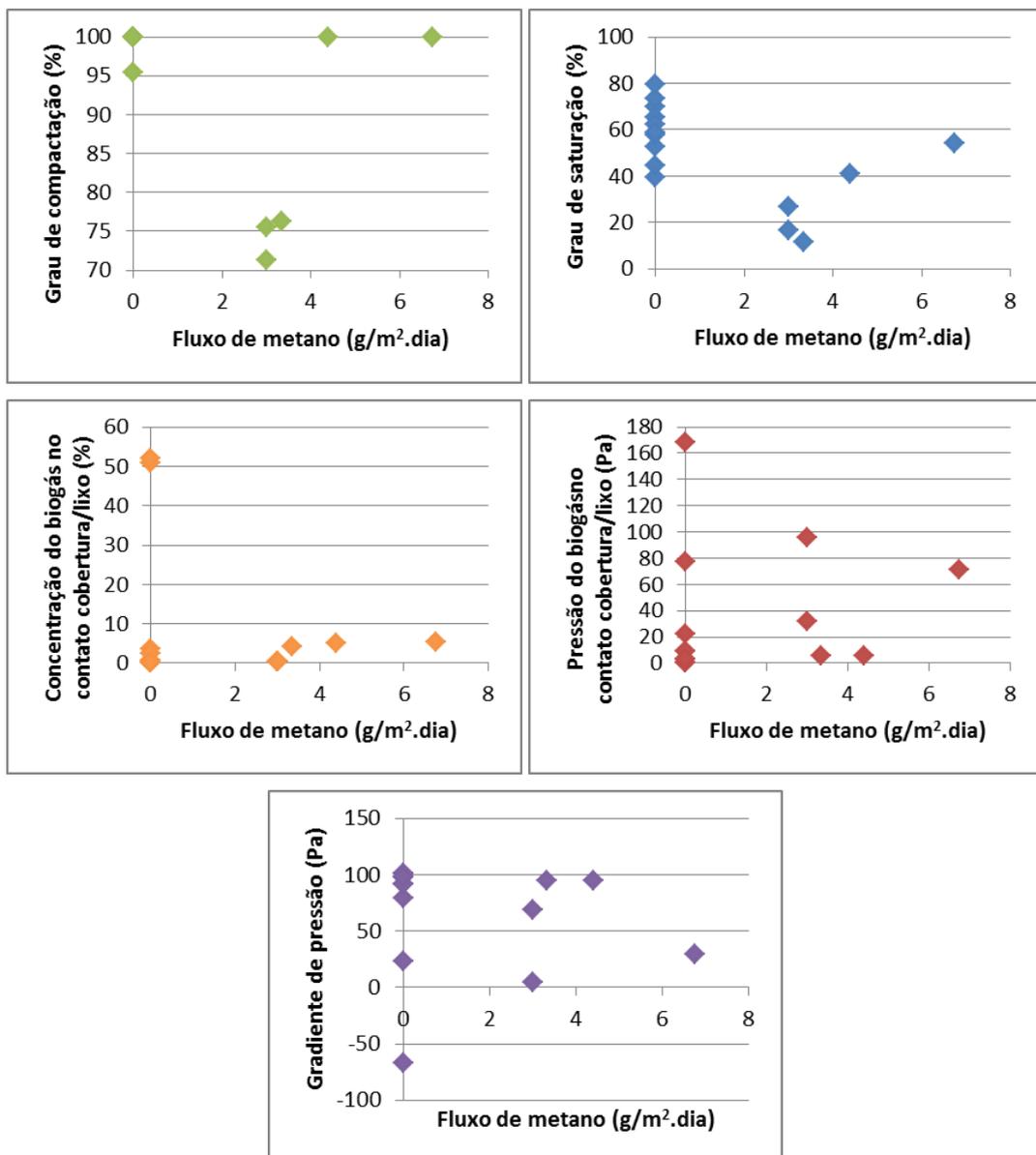
Nome do ensaio	Data do ensaio	Fluxo de CH ₄ (g/m ² .dia)	Fluxo de CO ₂ (g/m ² .dia)	Grau de compactação (%)	Grau de saturação (%)	Pressão no contato cobertura/ lixo (Pa)	Pressão atmosférica (Pa)	Gradiente de pressão (Pa)	CH ₄ no contato cobertura/ lixo (%)	CH ₄ na placa de fluxo (%)	CO ₂ no contato cobertura/ lixo (%)	CO ₂ na placa de fluxo (%)
M1	23/09/2010	0,00	24,69	100,00	52,48	9,0	100,67	91,67	51,0	0,0	37,0	1,2
M2	01/10/2010	0,00	53,29	100,00	70,12	77,0	100,61	23,61	52,0	0,0	39,0	1,4
M3	15/10/2010	0,00	86,85	100,00	39,42	22,0	100,77	78,77	0,8	0,0	10,0	2,2
M4	28/10/2010	0,00	54,94	100,00	65,39	9,0	100,37	91,37	3,5	0,0	12,5	2,8
M5	11/11/2010	6,75	81,99	100,00	54,38	71,0	100,67	29,67	5,4	1,2	15,0	4,2
M6	30/11/2010	3,34	46,11	76,30	11,35	6,0	100,54	94,54	4,2	0,6	6,2	3,0
M7	10/12/2010	3,00	49,80	71,33	16,67	96,0	100,59	4,59	0,3	0,2	10,8	1,2
M8	05/01/2011	3,01	73,91	75,55	26,70	32,0	100,51	68,51	0,4	0,2	6,4	2,4
M9	11/01/2011	0,00	49,92	100,00	62,41	168,0	100,50	-67,50	0,3	0,0	19,0	1,4
M10	24/04/2012	0,00	0,00	100,00	57,78	3,0	100,64	97,64	0,0	0,0	10,4	0,0
M11	27/04/2012	0,00	0,00	95,42	44,69	3,0	100,59	97,59	0,0	0,0	8,8	0,0
M12	14/05/2012	0,00	0,00	100,00	58,60	0,0	100,66	100,66	0,0	0,0	9,6	0,0
M13	31/05/2012	4,40	32,44	100,00	41,19	6,0	100,98	94,98	5,0	0,3	23,5	0,8
M14	08/06/2012	0,00	0,00	100,00	73,52	0,0	100,91	100,91	2,6	0,0	12,2	0,0
M15	29/06/2012	0,00	0,00	100,00	79,73	3,0	100,73	97,73	0,0	0,0	9,8	0,0

Com relação ao grau de compactação, encontraram-se, na maior parte dos ensaios, valores acima de 95% (exceto os ensaios M6, M7 e M8), com uma variação de 72,27 a 154,25% e média de 115,80%.

De Setembro de 2010 e Janeiro de 2011 (período seco), a média do grau de saturação foi de cerca de 44,32%, e de Abril a Junho de 2012 (no período chuvoso), a média foi de 76,45%, havendo, desta forma, uma diferença média de cerca de 32,12%.

A Figura IV.9 mostra a relação entre as emissões de CH₄ na camada metanotrófica e os principais fatores que podem ter influenciado no fluxo do referido componente do biogás: grau de saturação e compactação, concentração de CH₄ e pressão no contato cobertura/resíduo, e gradiente de pressão (pressão atmosférica-pressão do biogás).

Figura IV.9: Fatores que podem influenciar na emissão de CH₄ na camada metanotrófica



A pressão do biogás no contato cobertura/lixo tem uma clara influência nas emissões de CH₄ da camada metanotrófica, pressões do biogás por volta de 30 Pa, mostraram um tendência a maiores emissões de metano. Não é possível notar influência da concentração de metano no contato cobertura/lixo, dos graus de compactação e saturação e do gradiente de pressão nas emissões desta camada, de forma isolada.

Com isso, de forma semelhante a barreira capilar, para camada metanotrófica, os parâmetros relativos ao solo da camada de cobertura e ao biogás influenciam de uma forma conjunta nas emissões fugitivas. Os parâmetros do solo demonstram a facilidade ou dificuldade da passagem do biogás pela camada, e as variáveis do biogás confinado apresenta as características que o faz ultrapassar a camada de cobertura para fora da massa de resíduos.

LOPES (2011) verificou emissões na mesma camada deste estudo, e concluiu que para gradientes de pressão acima de 50 Pa e concentração de CH₄ acima de 50%, no contato cobertura/lixo, há uma tendência de maiores emissões de metano, em contraposição, valores de saturação acima de 65%, o fluxo é nulo ou muito pequeno.

Nos estudos de LOPES (2011), de 2009 à 2012 e com esta mesma camada, a variação das emissão CH₄ foi de 0 a 151g/m².dia.

4.3.4 Comparação das emissões de metano dentre as camadas estudadas

Com o objetivo de avaliar o comportamento das três camadas em estudo, as Figuras IV. 10 e 11 mostram os fluxos de metano e dióxido de carbono das três camadas de cobertura em estudo. Lembrando que, devido as diversas variáveis envolvidas no processo, os ensaios nos três diferentes tipos de camada de cobertura foram realizados no mesmo dia, objetivando, desta forma, uniformizar o efeito das condições meteorológicas e geração de biogás na célula de RSU.

Figura IV.10: Fluxo de CH₄ nos ensaios realizados no período de estudo

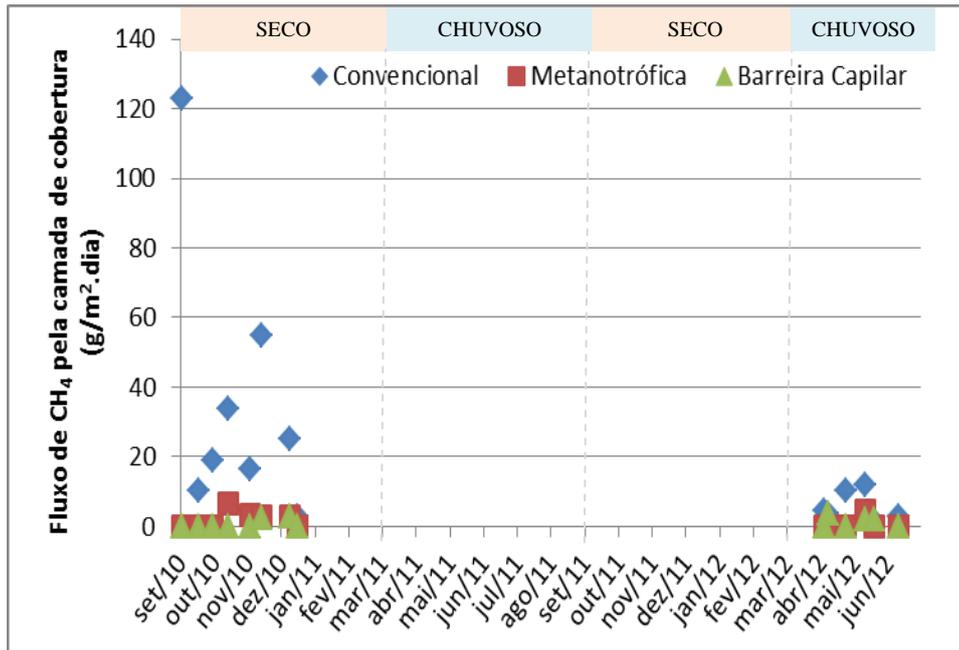
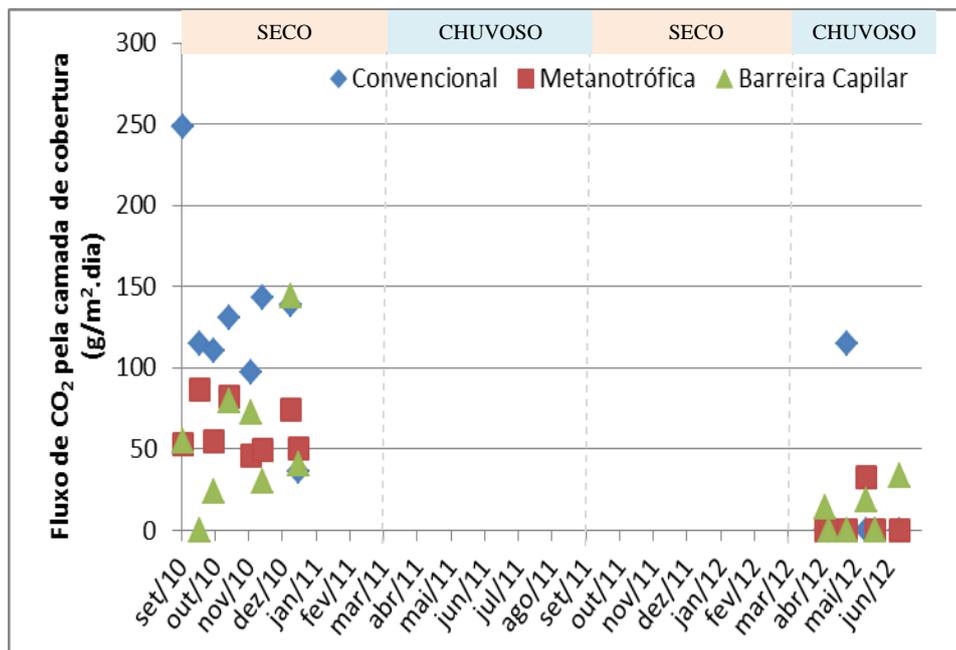


Figura IV.11: Fluxo de dióxido de carbono nos ensaios realizados no período de estudo



A Camada Convencional apresentou maiores fluxos de ambos os gases. Em contraposição, verifica-se que a Barreira capilar apresentou as menores taxas de fluxo de CH₄ e CO₂ em todos os dias avaliados.

LOPES (2011) estudou as mesmas camadas concluiu que a camada convencional apresentou emissões 6 vezes superior às camadas barreira capilar e metanotrófica, onde a faixa de emissão da camada convencional foi de 0 a 250 g/m².dia de CH₄, e nas demais camadas foi de 0 a 40 g/m².dia.

Para esse estudo encontrou-se um fluxo médio de CH₄, 6 vezes maior para a camada metanotrófica e 15 vezes maior para a barreira capilar, com relação a camada convencional.

4.4 Emissões de biogás pelos drenos e pela camada de cobertura

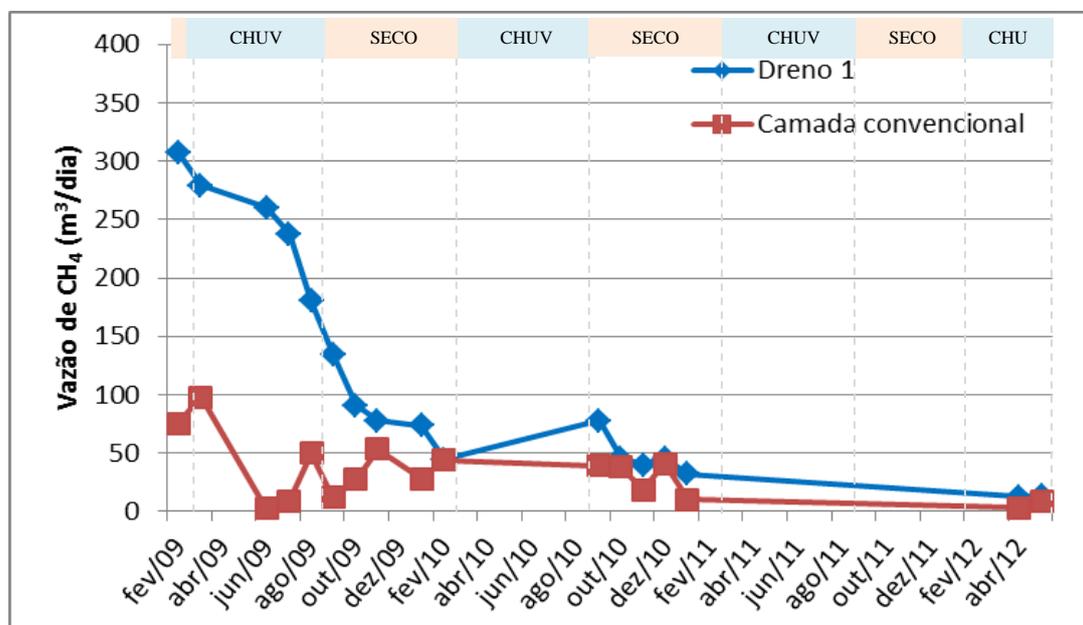
O período analisado foi de Fevereiro de 2009 a Maio de 2012, período no qual tem-se dados das emissões pelo sistema de drenagem e pelas camadas de coberturas avaliadas.

Para uma melhor compreensão do estudo, dividimos a apresentação dos dados e análise dos resultados por camada. Assim, inicialmente iniciaremos com a camada convencional, depois com a barreira capilar e por último com a camada metanotrófica.

4.4.1 Camada convencional

A Figura IV.12 apresenta as emissões de metano pelo dreno 1, localizado na camada convencional, e pela referida camada de cobertura, durante um período de tempo de 3 anos.

Figura IV.12: Emissões de metano pelo dreno 1 e pela camada convencional ao longo do tempo

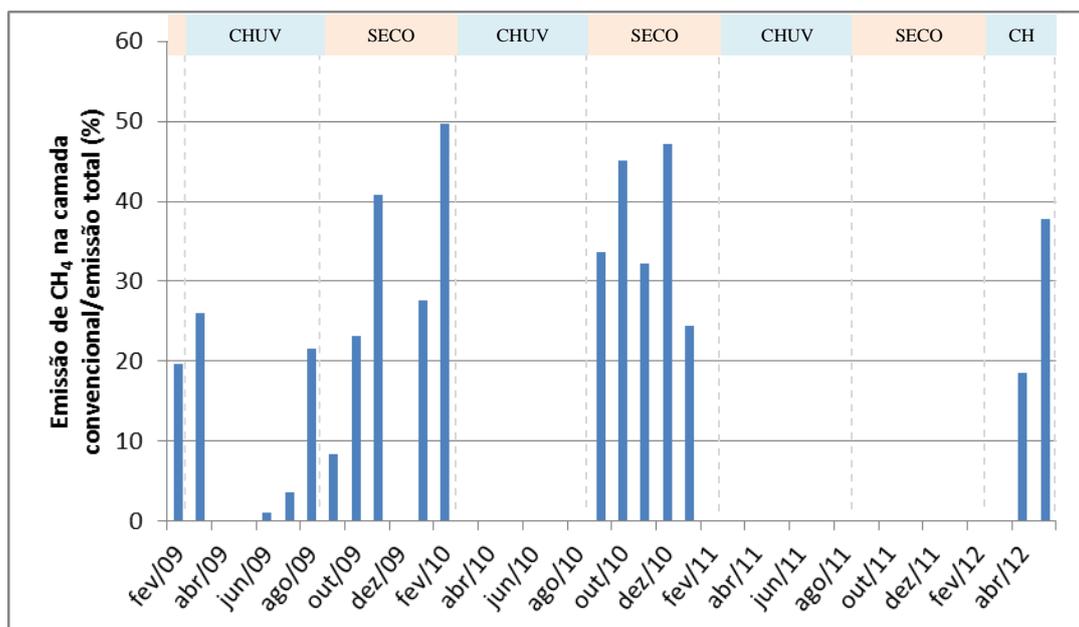


Nota-se uma redução das emissões tanto pelo dreno quanto pela camada de cobertura ao longo do período observado. Outro fator bastante importante são os períodos secos e chuvosos, nos quais

observa-se maiores e menores emissões pela camada de cobertura, respectivamente. O comportamento inverso ocorre no sistema de drenagem.

A Figura IV.13 mostra a relação da emissão pela camada de cobertura/emissão total (E_{cc}/E_T) para a camada convencional.

Figura IV.13: Relação entre as emissões de metano pela camada convencional e a emissão total ao longo do tempo



A camada convencional emitiu cerca de 27% de metano e 37% de dióxido de carbono da emissão total, no período estudado.

Subdividindo-se o período de estudo em épocas secas e chuvosas obtiveram-se diferentes porcentagens de emissões pela camada convencional, são elas:

- No primeiro período seco analisado, a camada emitiu de 19,70% de CH₄ e 20,87% de CO₂ da emissão total;
- No primeiro período chuvoso analisado, a camada emitiu de 13,06% de CH₄ e 19,10% de CO₂ da emissão total;
- No segundo período seco analisado, a camada emitiu de 29,91% de CH₄ e 37,80% de CO₂ da emissão total;
- No terceiro período seco analisado, a camada emitiu de 36,49% de CH₄ e 57,55% de CO₂ da emissão total;

- No segundo período chuvoso analisado, a camada emitiu de 28,20% de CH₄ e 27,35% de CO₂ da emissão total.

Com isso, nota-se uma elevação de 16,79 e 36,68%, nas emissões de CH₄ e CO₂, respectivamente, entre o primeiro e terceiro período seco. Para o período chuvoso, o incremento nas emissões foram de 15,13% de CH₄ e 8,25% de CO₂.

Desta forma, observa-se que mesmo produzindo menos biogás, as emissões fugitivas pela camada de cobertura aumentaram ao longo do tempo, visto que a proporção E_{cc}/E_T foi crescente com o passar dos anos, indicando a perda de qualidade da camada convencional.

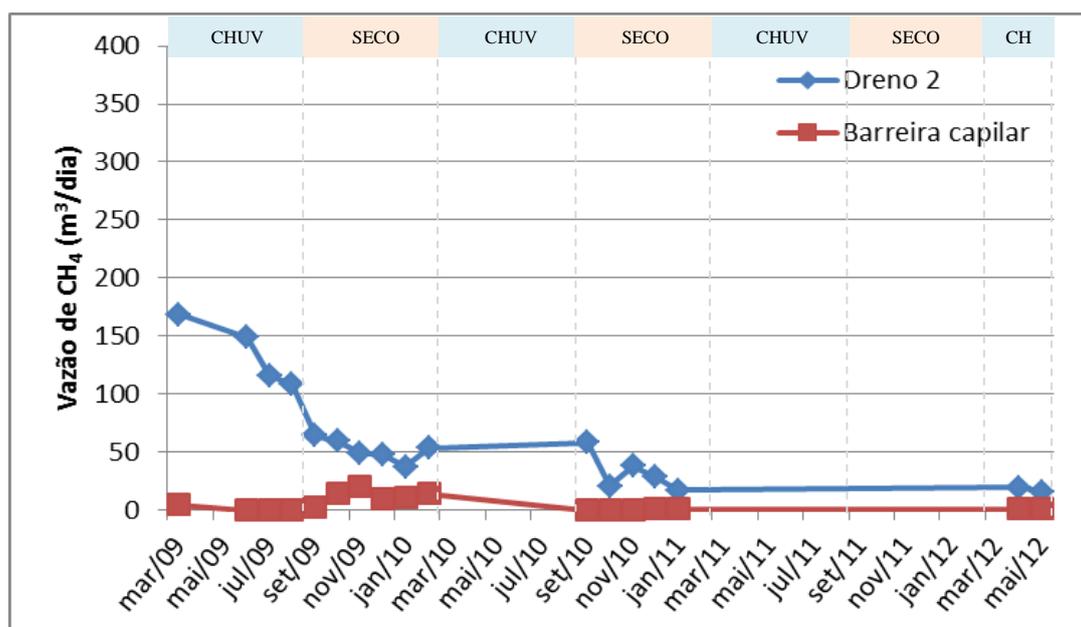
Nota-se também uma forte influencia das condições climáticas, visto que as médias de emissões para o período chuvoso foram de 18 e 22%, para metano e dióxido de carbono, respectivamente. Em contraposição, no período seco a média foi de 32% de CH₄ e 45% de CO₂.

Confirmando a afirmação de FISCHER (1999), de que as emissões em aterros de RSU variam muito ao longo das estações do ano (sazonalmente).

4.4.2 Barreira capilar

A Figura IV.14 ilustra as emissões de metano pelo dreno 2, localizado na barreira capilar, e pela referida camada de cobertura, durante um período de tempo de 3 anos.

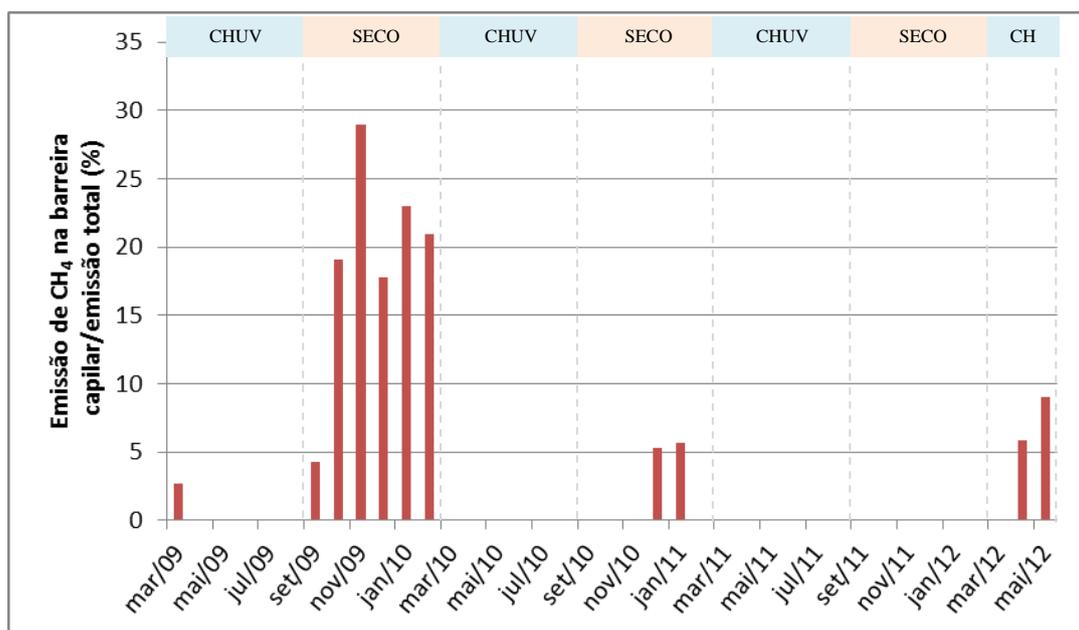
Figura IV.14: Emissões de metano pelo dreno 2 e pela barreira capilar ao longo do tempo



Também para a barreira capilar, tem-se um decréscimo das emissões do dreno e da camada de cobertura ao longo do período estudado. Nota-se também a influência dos períodos secos e chuvosos, onde se observa elevações ou reduções das emissões pela camada de cobertura e pelo sistema de drenagem.

A Figura IV.15 mostra a relação da emissão pela camada de cobertura/emissão total (E_{cc}/E_t) para a barreira capilar.

Figura IV.15: Relação entre as emissões de metano pela barreira capilar e a emissão total ao longo do tempo



A barreira capilar emitiu aproximadamente 7% de CH₄ e 18% de CO₂ da emissão total, no período estudado.

Fragmentando o período de estudo em épocas secas e chuvosas encontraram-se distintas porcentagens de emissões pela barreira capilar, são elas:

- No primeiro período chuvoso analisado, a camada emitiu de 0,68% de CH₄ e 0,29% de CO₂ da emissão total;
- No primeiro período seco analisado, a camada emitiu de 19,00% de CH₄ e 19,80% de CO₂ da emissão total;
- No segundo período seco analisado, a camada emitiu de 2,18% de CH₄ e 18,54% de CO₂ da emissão total;
- No segundo período chuvoso analisado, a camada emitiu de 7,41% de CH₄ e 8,93% de CO₂ da emissão total.

Com isso, nota-se que para o período chuvoso, não houve incremento nas emissões. No entanto, entre o primeiro e segundo período seco, ocorreu uma elevação de 6,73 e 8,64%, nas emissões de CH_4 e CO_2 , respectivamente.

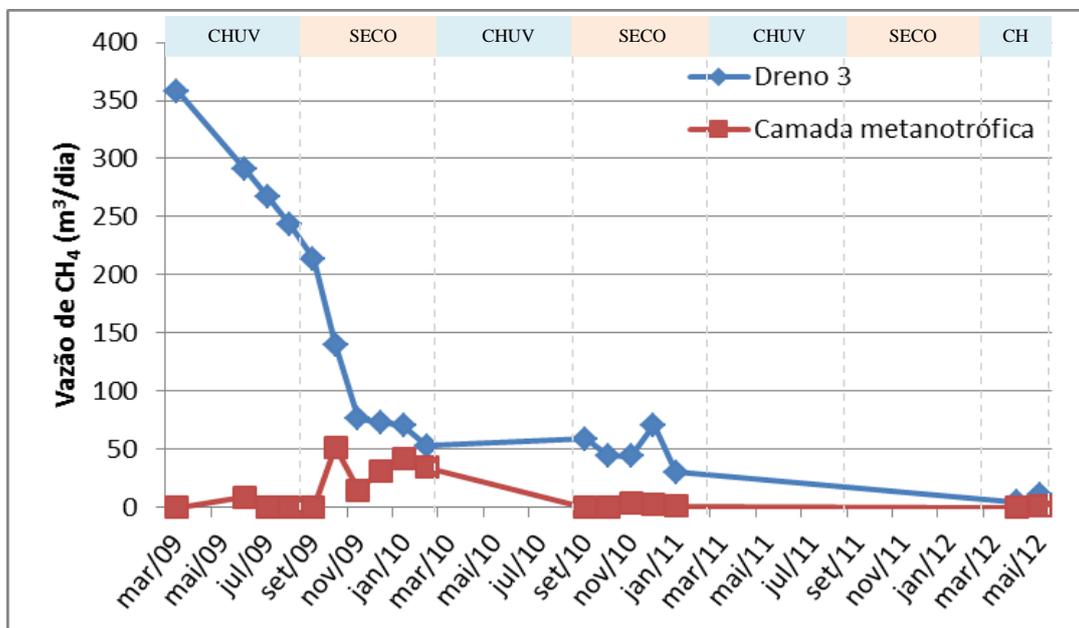
Para esta camada, a proporção E_{cc}/E_T sofreu um aumento no passar do tempo, e principalmente nos períodos secos, desta forma, pode-se dizer que esta camada está emitindo mais proporcionalmente a emissão total do Aterro e consequentemente a produção de biogás pela Célula de RSU. Mostrando, com isso, que a barreira capilar perdeu a capacidade que tinha inicialmente de reter o biogás, em especial nos períodos mais críticos do ano.

Nesta camada também nota-se uma forte influencia das chuvas, visto que as médias de emissões para o período chuvoso foram de 2 e 4%, para metano e dióxido de carbono, respectivamente. E no período seco a média foi de 9% de CH_4 e 25% de CO_2 .

4.4.3 Camada metanotrófica

A Figura IV.16 mostra as emissões de metano pelo dreno 3, localizado na camada metnotrófica, e pela referida camada de cobertura, durante um período de tempo de 3 anos.

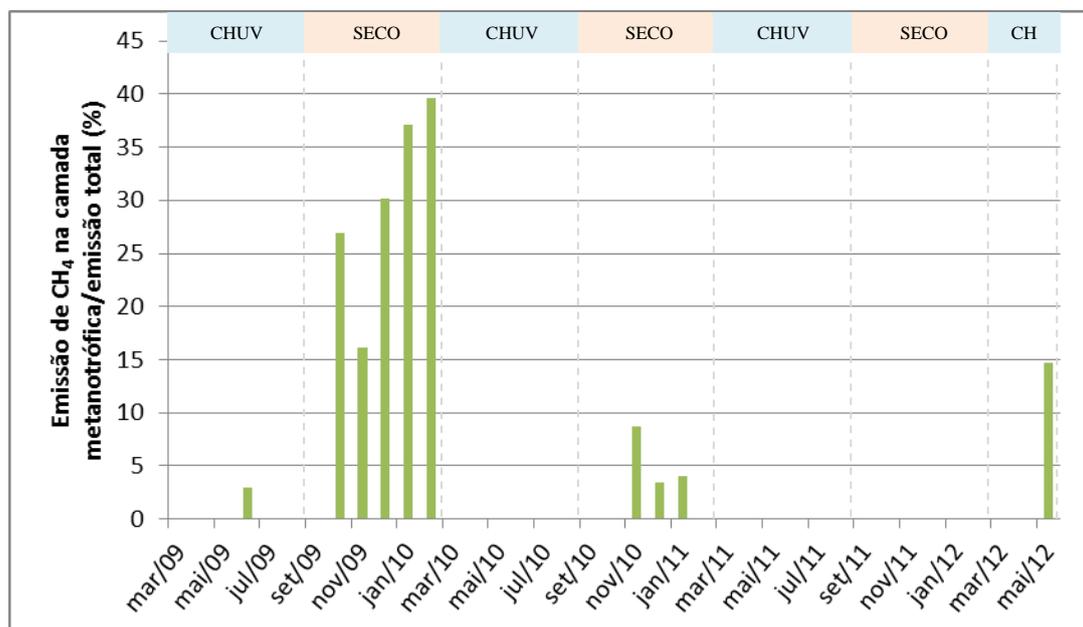
Figura IV.16: Emissões de metano pelo dreno 3 e pela camada metanotrófica ao longo do tempo



O comportamento na camada metanotrófica foi semelhante a das demais camadas de cobertura já analisadas: (i) houve uma redução das emissões do dreno 3 e da camada de cobertura estudada durante período estudado; (ii) e notou-se uma influência dos períodos secos e chuvosos, onde observa-se maiores e menores emissões pela camada de cobertura, respectivamente. O comportamento inverso ocorre no sistema de drenagem.

A Figura IV.17 apresenta a relação da emissão pela camada de cobertura/emissão total (E_{cc}/E_t) para a camada convencional.

Figura IV.17: Relação entre as emissões de metano pela camada metanotrófica e a emissão total ao longo do tempo



A camada metanotrófica emitiu cerca de 11% de CH₄ e 28% de CO₂ da emissão total, no período estudado.

Subdividindo-se o período de estudo em épocas secas e chuvosas encontraram-se diferentes porcentagens de emissões pela camada metanotrófica, são elas:

- No primeiro período chuvoso analisado, a camada emitiu de 0,73% de CH₄ e 2,54% de CO₂ da emissão total;
- No primeiro período seco analisado, a camada emitiu de 24,97% de CH₄ e 38,76% de CO₂ da emissão total;
- No segundo período seco analisado, a camada emitiu de 3,22% de CH₄ e 39,60% de CO₂ da emissão total;

- No segundo período chuvoso analisado, a camada emitiu de 7,35% de CH₄ e 16,20% de CO₂ da emissão total.

Desta forma, nota-se que para o período chuvoso, o não houve incremento nas emissões. Em contraposição, entre o primeiro e segundo período seco, ocorreu uma elevação de 6,61 e 13,66%, nas emissões de CH₄ e CO₂, respectivamente.

A proporção E_c/E_T , para esta camada, também se elevou ao longo do tempo, principalmente nos períodos secos, indicando a perda de qualidade da camada metanotrófica.

Para esta camada, nota-se uma forte influencia sazonal, visto que as médias de emissões para o período chuvoso foram de 3% de CH₄ e 7% de CO₂, e no período seco a média foi de 15 e 39%, de CH₄ e CO₂, respectivamente.

Nos estudos realizados por LOPES (2011) nestas mesmas configurações de camada, observou-se que as emissões de metano apresentaram um padrão sazonal e bastante relacionado com as variações climáticas, devido a influência nas condições de saturação do solo e nos processos de oxidação.

CAPITULO V – CONSIDERAÇÕES FINAIS E SUGESTÕES PARA NOVAS PESQUISAS

5.1 Considerações finais

- Todas as camadas foram classificadas como siltes de baixa plasticidade, segundo o Sistema Unificado de Classificação dos Solos.
- A vazão de biogás emitida e pressão do biogás pelo sistema de drenagem foi significativamente reduzida ao longo dos 4 anos estudados, devido a degradação dos resíduos aterrados, no entanto, pode-se observar incrementos de vazão, nos períodos chuvosos.
- Com relação a composição do biogás nota-se que a influência do ambiente é intensificada nos períodos secos, quando a camada de cobertura está menos úmida e o oxigênio consegue penetrar na massa de resíduos.
- Para todas as camadas estudadas, pode-se observar que os parâmetros inerentes ao biogás produzido pelos resíduos aterrados, principalmente a pressão, possuem uma nítida correlação com as emissões fugitivas pela camada.
- A camada convencional apresentou fluxos de metano, 6 vezes maior para a camada metanotrófica e 15 vezes maior para a barreira capilar.
- Tanto a convencional quanto as alternativas, tiveram as emissões fugitivas em termos de fluxo de metano e dióxido de carbono reduzida ao longo de 3 anos analisados (2009-2012).
- Também pode-se observar a diferença entre os períodos secos ou chuvosos, onde há maior facilidade ou dificuldade de o biogás escapar pela camada de cobertura.
- As porcentagens de relação emissão pela camada de cobertura/emissão total se elevou ao longo do tempo, demonstrando perda de qualidade das camadas de coberturas estudadas. Também notou-se uma influência dos períodos secos e chuvosos.

5.2 Sugestões para novas pesquisas

- 1) Realizar uma caracterização dos resíduos aterrados, para avaliar o potencial de produção do biogás atual;
- 2) Verificar se houve colmatção dos drenos de biogás da célula experimental, devido a queda brusca da pressão do biogás no sistema;
- 3) Caracterizar cada subcamada das camadas alternativas de forma isolada, objetivando avaliar a lixiviação de partículas de uma subcamada para a outra;
- 4) Determinar a permeabilidade à água e ao ar das camadas alternativas;
- 5) Realizar a manutenção das camadas de cobertura, de forma a avaliar as emissões pela camada de cobertura;
- 6) Modelar o comportamento das emissões fugitivas de biogás pela camada de cobertura;
- 7) Determinar a taxa oxidação do metano nas camadas alternativas, além de identificar e quantificar as bactérias metanotróficas presentes nas camadas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVES & VIEIRA (1998) Relatórios de referência: Emissões de gases de efeito estufa no tratamento e disposição de resíduos. **Segundo Inventário Brasileiro de Emissões Antrópicas de Gases de Efeito Estufa**, Ministério da Ciência e Tecnologia.

ALMEIDA, J. R. (2011) **Estudo do comportamento de barreira capilar em aterros de resíduos**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio de Janeiro. 175p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT (1984a) **NBR 6.459/84 – Solo – Determinação do Limite de Liquidez**. Rio de Janeiro, RJ.

_____ (1984b) **NBR 6.508/84 – Grãos de Solos que Passam na Peneira de 4,8mm – Determinação da Massa Específica dos grãos**. Rio de Janeiro, RJ.

_____ (1984c) **NBR 7.180/84 – Solo – Determinação do Limite de Plasticidade**. Rio de Janeiro, RJ.

_____ (1984d) **NBR 7.181/84 – Análise granulométrica para solos, com determinação de diâmetro correspondente a cada fração de material**. Rio de Janeiro, RJ.

_____ (1986a) **NBR 6.457/86 – Amostra de Solo - Preparação para Ensaios de Compactação e Ensaios de Caracterização**. Rio de Janeiro, RJ.

_____ (1986b) **NBR 7.182/86 – Ensaio de Compactação utilizando energia de compactação normal**. Rio de Janeiro, RJ.

_____ (1986c) **NBR 6.457/86 – Amostras de Solo – Preparação para Ensaios de Compactação e Ensaios de Caracterização**. Rio de Janeiro, RJ.

_____ (1987) **NBR 9.813/86 – Solo - Massa específica pelo cilindro de cravação**. Rio de Janeiro, RJ.

_____ (1995) **NBR 6.502/95 – Solos e rochas**. Rio de Janeiro, RJ.

_____ (1997) **NBR 13.896/97 – Aterros de resíduos não perigosos - Critérios para projeto, implantação e operação**. Rio de Janeiro, RJ.

ASTM (2010) **D5084-10 - Standard Test Methods for Measurement of Hydraulic Conductivity of Saturated Porous Materials Using a Flexible Wall Permeameter**. American Society for Testing and Materials. Volume 04.08. Soil and Rock (I): D420 - D5876.

AUGENSTEIN, D. & PACEY, J. (1991) Modelling landfill methane generation. In: **Proceedings Sardinia 1991**. The Third International Landfill Symposium, Sardinia, Itália, vol.1, pp.115- 148.

BOECKX, P. *et. al.* (1996) Methane emission from a landfill and the methane oxidising capacity of its covering soil. **Soil Biology & Biochemistry**, v. 28, n. 10-11, p. 1397-1405.

BOGNER, J.*et. al.* (1997) Emissions of non-methane organic compounds at Illinois (USA) landfill site: preliminary field measurements. In: **Proceedings Sardinia 1997**, The Sixth International Waste Management and Landfill Symposium, Cagliari, Itália, vol. 4. pp 127-138.

BRASIL (2010) **Lei 12.305 de 02 de agosto de 2010**. Política Nacional de Resíduos Sólidos. Disponível em: < http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato20072010/2010/lei/112305.htm> Acesso em 17 de setembro de 2013.

BRASIL (2008) **Lei 12.187 de 29 de dezembro de 2009**. Política Nacional sobre Mudança do Clima. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2009/lei/112187.htm> Acesso em 17 de setembro de 2013.

BRAGA, J. M. C. (2011) Previsão da Produção de Biogás em Aterros de Resíduos Sólidos Urbanos. Dissertação de Mestrado. Universidade de Coimbra. 75 p.

BRITO FILHO, L. F. (2005) **Estudo de gases em aterros de resíduos sólidos urbanos**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio de Janeiro. 218 p.

CATAPRETA, C. A. A. (2008) **Comportamento de um Aterro Sanitário Experimental: Avaliação da influência do projeto, construção e operação**. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Minas Gerais. 316 p.

COELHO, H.M.G. *et. al.* (2005) **Avaliação do Desempenho de Camadas de Cobertura Intermediária e Finais em Células Experimentais de Disposição de Resíduos Sólidos Urbanos**. 23º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental.

EL-FADEL, M. *et. al.* (1997) **Environmental Impacts of Solid Waste Landfilling**. In: Journal of Environmental Management, v. 50, n. 1, pp. 1 – 25.

ENVIRONMENT AGENCY (2004) **Guidance on monitoring landfill gas surface emissions**, Landfill Directive vol.07, Bristol, UK. Setembro, 2004.

EPA 542-F-03-015 (2003) **Evapotranspiration landfill cover systems fact sheet**. United States Environmental Protection Agency.

07, Bristol, UK. Setembro, 2004. FIRMO, A. L. B. (2013) **Estudo da geração de biogás a partir da biodegradação de resíduos sólidos urbanos**. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Pernambuco. 279 p.

FISCHER, K. (1999) **Gas emissions from Landfills: An overview of issues and research needs**. AFR-REPORT 264. 57p.

FREDLUND, D. G. & RAHARDJO, H. (1993) **Soil Mechanics for Unsaturated Soils**. Ed. John Wiley & Sons, Inc. New York. 486p.

GUEDES, V. P. (2007) **Estudo do fluxo de gases através do solo de cobertura de aterro de resíduos sólidos urbanos**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio de Janeiro. 125 p.

HETTIARATCHI J.P.A. & PERERA, M.D.N. (2009) **Design of landfill cover systems incorporating soil methanotrophy for methane emission mitigation**. 11p. Disponível em: <<http://www.faculty.ait.ac.th/visu/Data/Publications/conference%20pdf%20files/1995-1999%20pdfs/DESIGN%20OF%20LANDFILL%20COVER%20SYSTEMS%20INCORPORATING%20SOIL%20METHANOT.pdf>>. Acesso em 08 março 2012.

IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change (1996) **Good Practice Guidance and Uncertainty Management in National Greenhouse Gas Inventories**, Chapter 5: waste.

IZZO, R. L. S. *et. al.* (2005) Perspectivas do uso do resíduo sólido urbano pré-tratado mecânica e biologicamente como barreira capilar em um aterro sanitário. **24º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental**. Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental (ABES).

JUCÁ, J.F.T. (1990). **Comportamiento de los suelos parcialmente saturados bajo succión controlada**. Tese de Doutorado, Engenharia Civil, Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas, Madrid, España.

JUCÁ, J. F. T. (1993) **Flow Properties of Unsaturated Soils under Controlled Suction**. ASCE Special Geotechnical Publication, Virginia, USA, v. 39, n. 1, p. 151-162, 1993. ISBN 978-0-87262-988-2.

- JUNQUEIRA, F. F. (2000) **Análise do comportamento de resíduos urbanos e sistemas drenos filtrantes em diferentes escalas, com referência ao Aterro do Jóquei Clube**. Tese de Doutorado. Universidade de Brasília. 315 p.
- LAFAYETTE, K. P. V. (2000) **Comportamento Geomecânico de Solos de uma Toposequência na Formação Barreiras em uma Encosta na área Urbana do Recife-PE**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Pernambuco. 122p.
- LOPES, R. L. (2009) **Estudo de propriedades de solos utilizados em camadas de cobertura dos Aterros de Resíduos Sólidos Urbanos e a influência na minimização de emissão de gases e geração de lixiviados**. Projeto de tese. Universidade Federal de Pernambuco. 24 p.
- LOPES, R. L. (2010) **Infiltração de águas e fluxo de biogás em camadas de cobertura de Aterros de Resíduos Sólidos**. Seminário de Qualificação. Universidade Federal de Pernambuco. 129 p.
- LOPES, R. L.(2011) **Infiltração de água e emissão de metano em camadas de cobertura de Aterros de Resíduos Sólidos**. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Pernambuco. 268 p.
- MACIEL, F. J. (2003) **Estudo da geração, percolação e emissão de gases no aterro de resíduos sólidos da Muribeca/PE**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Pernambuco. 173 p.
- MACIEL, F. J. (2009) **Geração de Biogás e Energia em Aterro Experimental de Resíduos Sólidos Urbanos**. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Pernambuco. 333 p.
- MARIANO, M. O. H.; (2008) **Avaliação da retenção de gases em camadas de cobertura de aterro de resíduos sólido**. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Pernambuco. 243p.
- MARIANO, M. O. H. & JUCÁ, J. F. T. (2010) **Ensaio de campo para a determinação de emissões de biogás em camadas de cobertura de aterros de resíduos sólidos**. Revista de Engenharia Sanitária e Ambiental. v. 15, n. 3, p. 223-228.
- MARINHO, F. A. M. (1997) **Medição de Sucção em Solos**. 3º Simpósio Brasileiro de Solos Não Saturados, Vol. 2 p. 373-397.
- MARINHO, F. A. M. (2005) **Os solos não saturados: Aspectos teóricos, experimentais e aplicados**. Texto apresentado para o Concurso de Livre-Docência. Universidade de São Paulo. 201 p.

- McCARTNEY, J. S. & ZORNBERG, J. G. (2002) Design and performance criteria for evapotranspirative cover systems. **Proceedings of the Fifth International Conference on Environmental Geotechnics**. A. A. Balkema, 1:195-200.
- NIKIEMA, J.; BRZEZISNKI, R.; HEITZ, M. (2007) Elimination of methane generated from landfills by biofiltration: a review. **Rev. Environmental Science Biotechnology**. 6:261-284.
- MONCADA, M. P. H. (2004) **Estudo em Laboratório de Características de Colapso e Transporte de Solutos Associados à Infiltração de Licor Cáustico em um Solo Laterítico**. Dissertação de Mestrado. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.
- Norma BSI 1042-2.3 – 19984 – Measurement of Fluid flow in closed conduits. Velocity area methods. Methods of flow measurement in swirling or asymmetric flow conditions in circular ducts by means of currentmeters or Pilot static tubes.
- ROSE, J.L. (2009) **Análise comparativa entre as reduções da emissão de metano em camada oxidativas experimentais**. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio de Janeiro. 166p.
- TAGARIS et. al. (2003) Atmospheric methane transport near landfill sites. **Waste Manage Res** 21: 62–73.
- TEIXEIRA, C. E. *et. al.* (2009) **Estudos sobre a oxidação aeróbia do metano na cobertura de três aterros sanitários no Brasil**. Revista de Engenharia Sanitária e Ambiental. v. 14, n. 1, p. 99-108.
- van GENUCHTEN, M. Th (1980) A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Proc. Soil Sci. Soc. Am.** Vol. 44, no. 5 p. 892-898.
- VIEIRA, A. M (2005) **Estudo de barreiras capilares como Cobertura final de aterro de resíduos**. Tese de Doutorado. Universidade Federal de São Paulo. 287p.
- WEIB, J. & WITZSCHE, A. (2005) **Results of the efficiency of the capillary barrier system at the landfill grix Offenbach-germany**. Proceedings Sardinia, Italy.
- ZORNBERG, J. G. *et. al.* (2003) Analysis and design of evapotranspirative cover for hazardous waste landfill. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v. 129, n. 6, pp. 427 – 438.

ANEXO I

Base de dados de emissões fugitivas na célula experimental coletada pelos autores MACIEL (2009) e LOPES (2011).

Camada Convencional

Data	Fluxo de CH ₄ (g/m ² .dia)	Fluxo de CO ₂ (g/m ² .dia)	Grau de compactação (%)	Grau de saturação (%)	Pressão no contato cobertura/lixo (Pa)	CH ₄ no contato cobertura/lixo (%)	CO ₂ no contato cobertura/lixo (%)
20/9/2008	2,10	6,70	103,0	46,5	-	55,0	40,0
7/10/2008	1332,00	-	-	-	-	-	-
7/10/2008	253,80	1063,60	-	-	-	-	-
7/10/2008	984,70	1899,70	-	-	-	-	-
7/10/2008	11,70	37,10	-	-	-	-	-
4/11/2008	46,60	147,10	93,5	46,8	-	-	-
18/11/2008	8,90	35,90	94,9	42,0	-	-	-
4/12/2008	2,60	36,00	93,7	49,3	-	7,4	7,4
16/12/2008	57,20	163,10	92,9	52,8	-	55,0	40,0
17/12/2008	86,20	238,30	83,1	37,8	-	55,0	40,0
5/2/2009	137,60	262,00	103,7	79,0	-	-	-
5/2/2009	64,30	144,80	93,5	73,0	-	-	-
26/3/2009	131,20	360,30	94,7	42,2	-	-	-
9/6/2009	0,00	57,40	95,6	51,0	-	11,4	9,0
18/6/2009	0,00	102,70	85,6	56,9	-	0,7	0,8
18/6/2009	0,00	0,00	93,1	49,9	-	58,0	41,0
26/6/2009	14,80	61,80	95,9	73,9	-	-	-
8/7/2009	11,90	56,50	96,8	78,8	-	-	-
25/8/2009	0,00	0,00	97,3	90,4	-	56,0	36,0
26/8/2009	4,80	15,90	94,1	83,8	-	57,0	39,0

Data	Fluxo de CH ₄ (g/m ² .dia)	Fluxo de CO ₂ (g/m ² .dia)	Grau de compactação (%)	Grau de saturação (%)	Pressão no contato cobertura/lixo (Pa)	CH ₄ no contato cobertura/lixo (%)	CO ₂ no contato cobertura/lixo (%)
26/8/2009	194,90	381,50	98,8	78,0	-	56,0	37,0
8/9/2009	5,05	18,75	97,6	51,9	-	57,0	38,0
9/9/2009	27,99	49,26	100,3	34,1	-	55,0	35,0
7/10/2009	0,00	0,00	99,2	35,2	0,0	56,0	39,0
29/10/2009	73,24	159,05	89,5	21,7	0,0	56,0	39,0
12/11/2009	124,35	332,29	93,0	26,3	0,0	56,0	39,0
23/11/2009	19,31	45,34	87,3	23,7	0,0	38,0	31,0
16/12/2009	433,91	526,02	93,3	59,0	34,0	53,0	39,0
16/12/2009	142,45	482,32	84,4	54,4	0,0	38,0	35,0
14/1/2010	0,00	101,68	73,3	29,1	3,0	15,4	20,5
14/1/2010	70,88	295,87	93,8	63,5	61,0	51,0	36,0
26/1/2010	43,85	388,66	85,6	51,7	16,0	22,0	27,0
26/1/2010	35,80	99,10	87,4	64,0	6,0	54,0	37,0
4/2/2010	90,89	201,26	110,3	61,9	0,0	41,0	36,0
9/2/2010	218,83	402,77	93,6	65,9	29,0	55,0	39,0
10/2/2010	18,03	133,73	93,6	41,8	0,0	13,5	19,5
19/2/2010	0,00	60,81	97,8	67,3	3,0	57,0	38,0
25/2/2010	0,00	99,97	93,6	41,8	0,0	26,0	19,0
25/2/2010	27,00	148,54	93,6	61,1	6,0	53,0	38,0

Barreira capilar

Data	Fluxo de CH ₄ (g/m ² .dia)	Fluxo de CO ₂ (g/m ² .dia)	Grau de compactação (%)	Grau de saturação (%)	Pressão no contato cobertura/lixo (Pa)	CH ₄ no contato cobertura/lixo (%)	CO ₂ no contato cobertura/lixo (%)
20/9/2008	4,90	0,00	107,7	59,8	-	25,0	12,4
7/10/2008	2,40	-	-	-	-	-	-
10/10/2008	63,36	119,1	-	-	-	-	-
19/10/2008	20,16	-	-	-	-	-	-
10/10/2008	63,40	119,10	-	-	-	-	-
23/10/2008	0,00	0,00	-	-	-	-	-
6/11/2008	1,80	0,00	94,4	55,3	-	-	-
19/11/2008	20,20	43,50	85,6	19,6	-	-	-
19/11/2008	41,70	112,30	98,7	48,6	-	-	-
3/12/2008	0,00	35,50	86,7	17,3	-	35,0	26,0
17/12/2008	11,60	87,60	78,6	37,2	-	13,6	14,0
17/12/2008	0,00	0,00	81,2	42,5	-	7,2	23,5
28/1/2009	0,00	0,00	99,2	66,9	-	19,0	19,0
27/3/2009	6,70	-	98,8	55,0	-	-	-
18/6/2009	0,00	0,00	96,0	60,6	-	6,8	6,0
25/6/2009	0,00	29,00	91,5	82,0	-	-	-
26/6/2009	0,00	0,00	88,4	83,0	-	-	-
9/7/2009	0,00	0,00	83,2	73,6	-	-	-
27/8/2009	0,00	0,00	95,5	84,7	-	34,0	23,0
27/8/2009	0,00	0,00	92,6	92,3	-	58,0	24,5

Data	Fluxo de CH ₄ (g/m ² .dia)	Fluxo de CO ₂ (g/m ² .dia)	Grau de compactação (%)	Grau de saturação (%)	Pressão no contato cobertura/lixo (Pa)	CH ₄ no contato cobertura/lixo (%)	CO ₂ no contato cobertura/lixo (%)
27/8/2009	0,00	0,00	95,3	77,6	-	54,0	36,0
8/9/2009	0,00	0,00	96,8	83,9	-	45,0	35,0
10/9/2009	8,10	22,40	90,1	53,6	-	56,0	40,0
13/10/2009	34,60	83,10	73,6	36,8	-	55,0	39,0
28/10/2009	5,60	0,00	89,1	60,0	0,0	13,6	17,5
12/11/2009	30,80	75,60	85,2	23,9	0,0	53,0	34,0
25/11/2009	26,60	49,00	85,0	53,6	-	17,0	25,0
16/12/2009	14,60	32,30	88,2	43,2	48,0	17,5	20,5
13/1/2010	27,10	66,20	88,2	38,4	0,0	40,0	33,0
13/1/2010	0,00	99,80	90,1	59,3	0,0	38,0	31,0
26/1/2010	37,00	205,60	85,1	46,8	12,0	55,0	39,0
27/1/2010	0,00	0,00	86,9	47,4	9,0	8,4	18,5
4/2/2010	45,00	148,20	98,6	61,6	6,0	33,5	33,0
10/2/2010	0,00	0,00	90,9	61,4	0,0	15,4	18,5
10/2/2010	36,30	233,90	90,9	61,1	9,0	56,0	38,0
19/2/2010	0,00	0,00	94,9	64,5	24,0	32,0	31,0

Camada Metanotrófica

Data	Fluxo de CH ₄ (g/m ² .dia)	Fluxo de CO ₂ (g/m ² .dia)	Grau de compactação (%)	Grau de saturação (%)	Pressão no contato cobertura/lixo (Pa)	CH ₄ no contato cobertura/lixo (%)	CO ₂ no contato cobertura/lixo (%)
4/9/2008	2,10	47,00	82,6	73,8	-	54,0	42,0
4/10/2008	6,40	54,90	-	24,7	-	3,4	2,8
7/10/2008	1053,84	-	-	-	-	-	-
7/10/2008	0,00	0,00	-	-	-	-	-
7/10/2008	0,00	0,00	-	-	-	-	-
20/10/2008	4,80	-	-	-	-	-	-
6/11/2008	74,10	100,60	98,9	53,0	-	-	-
12/11/2008	10,90	80,20	86,1	34,1	-	7,3	6,2
20/11/2008	4,70	44,00	72,6	20,5	-	-	-
4/12/2008	40,80	115,60	105,3	29,6	-	55,0	41,0
4/12/2008	38,30	111,40	92,9	24,6	-	-	-
28/1/2009	15,70	98,40	86,3	29,9	-	36,0	30,0
5/2/2009	23,40	61,70	97,1	67,3	-	-	-
28/3/2009	0,00	-	96,5	72,0	-	-	-
18/6/2009	0,00	0,00	91,3	52,3	-	38,0	27,0
25/6/2009	0,00	38,00	100,7	91,2	-	57,0	40,0
26/6/2009	31,60	124,80	89,4	54,2	-	58,0	41,0
8/7/2009	0,00	0,00	93,9	93,9	-	35,0	25,0
28/8/2009	0,00	16,90	116,6	82,1	-	44,0	35,0
28/8/2009	0,00	16,60	87,4	95,5	-	54,0	35,0

Data	Fluxo de CH ₄ (g/m ² .dia)	Fluxo de CO ₂ (g/m ² .dia)	Grau de compactação (%)	Grau de saturação (%)	Pressão no contato cobertura/lixo (Pa)	CH ₄ no contato cobertura/lixo (%)	CO ₂ no contato cobertura/lixo (%)
28/8/2009	0,00	0,00	104,9	80,4	-	55,0	27,0
8/9/2009	0,00	124,60	91,3	54,7	-	55,0	39,0
9/9/2009	0,00	0,00	97,3	88,2	-	53,0	33,0
7/10/2009	0,00	58,10	91,3	65,7	0,0	52,0	37,0
29/10/2009	123,80	343,50	92,7	10,4	0,0	23,0	15,2
10/11/2009	30,80	92,10	96,6	22,2	0,0	15,5	13,0
25/11/2009	4,30	67,80	87,9	50,6	0,0	23,0	28,0
16/12/2009	8,50	71,70	95,5	41,4	0,0	18,0	24,0
16/12/2009	69,80	193,10	94,2	42,4	3,0	12,6	18,0
17/12/2009	35,20	130,50	89,8	59,0	6,0	52,0	39,0
12/1/2010	35,80	297,60	97,1	59,7	3,0	53,0	40,0
12/1/2010	18,10	99,60	86,2	44,8	6,0	27,0	31,0
28/1/2010	140,30	405,00	90,9	29,8	51,0	57,0	39,0
28/1/2010	4,50	100,20	102,9	58,0	0,0	18,0	28,0
5/2/2010	0,00	60,70	90,2	68,2	3,0	20,5	30,0
12/2/2010	13,50	99,90	103,6	34,4	6,0	35,0	30,0
19/2/2010	0,00	100,80	105,4	72,5	0,0	8,8	23,5
26/2/2010	151,90	644,70	102,8	51,0	48,0	54,0	33,0

ANEXO II

Planilhas de cálculo da relação entre o fluxo médio mensal de metano e dióxido de carbono nas diferentes camadas e a emissão total

Camada Convencional

	MÊS	EMISSÃO DE CH ₄			EMISSÃO DE CO ₂		
		Dreno 1 (m ³ /dia)	Camada convencional - E _{cc} (m ³ /dia)	E _{cc} /E _T (%)	Dreno 1 (m ³ /dia)	Camada convencional - E _{cc} (m ³ /dia)	E _{cc} /E _T (%)
P. SECO	Fev/09	307,29	75,40	19,70	222,99	58,8	20,87
PERÍODO CHUVOSO	Mar/09	279,32	98,00	25,97	199,17	104,16	34,34
	Jun/09	260,28	2,76	1,05	174,93	16,04	8,40
	Jul/09	237,5	8,89	3,61	147,99	16,33	9,94
	Ago/09	180,22	49,72	21,62	123,15	38,29	23,72
PERÍODO SECO	Set/09	134,9	12,34	8,38	87,18	9,83	10,13
	Out/09	90,98	27,35	23,11	60,52	22,99	27,53
	Nov/09	77,84	53,65	40,80	50,99	54,58	51,70
	Jan/10	73,66	28,11	27,62	48,67	63,96	56,79
	Fev/10	44,79	44,16	49,64	67,34	50,45	42,83
	Set/10	77,65	39,35	33,63	50,88	49,73	49,43
	Out/10	46,04	37,91	45,16	31,10	45,69	59,50
	Nov/10	39,7	18,83	32,17	27,26	32,89	54,68
	Dez/10	45,93	40,91	47,11	23,51	41,28	63,71
	Jan/11	32,38	10,44	24,38	16,57	25,29	60,41
PERÍO. CHUV	Abr/12	12,94	2,96	18,61	12,53	0,00	0,00
	Mai/12	13,75	8,35	37,78	13,76	16,62	54,70

Barreira capilar

	MÊS	EMISSÃO DE CH ₄			EMISSÃO DE CO ₂		
		Dreno 2 (m ³ /dia)	Barreira capilar - E _{cc} (m ³ /dia)	E _{cc} /E _T (%)	Dreno 2 (m ³ /dia)	Barreira capilar - E _{cc} (m ³ /dia)	E _{cc} /E _T (%)
PERÍODO CHUVOSO	Mar/09	168,26	4,68	2,71	235,97	0,00	0,00
	Jun/09	149,00	0,00	0,00	223,50	2,61	1,15
	Jul/09	115,90	0,00	0,00	192,19	0,00	0,00
	Ago/09	108,14	0,00	0,00	163,54	0,00	0,00
PERÍODO SECO	Set/09	63,92	2,83	4,24	96,73	3,03	3,04
	Out/09	59,49	14,04	19,10	88,07	11,24	11,32
	Nov/09	49,14	20,05	28,98	64,20	16,85	20,79
	Dez/09	47,24	10,20	17,76	67,84	8,73	11,40
	Jan/10	37,56	11,20	22,97	57,00	25,12	30,59
	Fev/10	53,54	14,20	20,96	36,17	25,83	41,66
	Set/10	58,06	0,00	0,00	91,47	0,00	0,00
	Out/10	20,56	0,00	0,00	45,71	7,14	13,51
	Nov/10	37,83	0,00	0,00	63,88	20,64	24,42
	Dez/10	28,28	1,57	5,26	47,99	8,08	14,41
Jan/11	16,90	1,01	5,64	36,83	24,95	40,38	
PERÍO. CHUV	Abr/12	19,62	1,22	5,85	26,26	1,92	6,81
	Mai/12	15,64	1,54	8,97	20,05	2,49	11,05

Camada Metanotrófica

	MÊS	EMISSÃO DE CH ₄			EMISSÃO DE CO ₂		
		Dreno 3 (m ³ /dia)	Camada metanotrófica - E _{cc} (m ³ /dia)	E _{cc} /E _T (%)	Dreno 3 (m ³ /dia)	Camada metanotrófica - E _{cc} (m ³ /dia)	E _{cc} /E _T (%)
PERÍODO CHUVOSO	Mar/09	357,92	0,00	0,00	257,45	0,00	0,00
	Jun/09	290,51	8,78	2,93	201,41	17,50	7,99
	Jul/09	267,74	0,00	0,00	169,49	0,00	0,00
	Ago/09	243,03	0,00	0,00	162,68	3,60	2,16
PERÍODO SECO	Set/09	213,62	0,00	0,00	146,16	20,09	12,08
	Out/09	139,83	51,57	26,94	97,38	64,74	39,93
	Nov/09	76,02	14,62	16,13	57,11	25,78	31,10
	Dez/09	73,19	31,52	30,10	54,80	42,49	43,67
	Jan/10	70,30	41,38	37,05	53,85	72,74	57,46
	Fev/10	52,59	34,45	39,58	78,10	73,04	48,33
	Set/10	59,08	0,00	0,00	38,89	7,96	16,99
	Out/10	44,48	0,00	0,00	21,85	20,97	48,97
	Nov/10	44,11	4,20	8,69	22,32	20,65	48,06
	Dez/10	70,70	2,50	3,42	41,04	16,06	28,13
	Jan/11	30,16	1,25	3,98	15,79	19,96	55,84
PERÍO. CHUV	Abr/12	4,71	0,00	0,00	7,54	0,00	0,00
	Mai/12	10,61	1,83	14,70	10,91	5,23	32,40